



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI SQUARE DUCT DAN
SQUARE ELBOW 90 DENGAN SINGLE GUIDE VANE PADA
VARIASI BUKAAN DAMPER**

**IMAM NUR FACHRUDIN
NRP. 2114 105 030**

**Pembimbing :
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**

**PROGRAM SARJANA
LABORATORIUM MEKANIKA DAN MESIN-MESIN FLUIDA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



FINAL PROJECT - TM141585

**NUMERIC INVESTIGATION OF FLOW THROUGH SQUARE
DUCT AND SQUARE ELBOW 90° WITH SINGLE GUIDE VANE
OF DAMPER OPENING VARIANT**

**IMAM NUR FACHRUDIN
NRP. 2114 105 030**

**Lecturer :
Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT**

**BACHELOR DEGREE PROGRAM
MACHINERY AND FLUID MECHANIC LABORATORY
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT*
DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN *SINGLE GUIDE*
VANE PADA VARIASI BUKAAN *DAMPER***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh :

IMAM NUR FACHRUDIN
NRP. 2114 105 030

Disetujui oleh Pembimbing & Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. (Penguji 1)
NIP. 196412281990031002
3. Nur Ikhwan, ST., M.Eng.Sc (Penguji 2)
NIP. 196709151995121001

SURABAYA
Juli, 2016

STUDI NUMERIK ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90⁰* DENGAN *SINGLE GUIDE VANE* PADA VARIASI BUKAAN *DAMPER*

Nama Mahasiswa : Imam Nur Fachrudin
NRP : 2114 105 030
Jurusan : S1 Teknik Mesin FTI - ITS
DosenPembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

ABSTRAK

Instalasi sistem perpipaan yang disebut *fitting* (aksesoris), yang mempunyai *koefisien losses (headloss total)* dan menyebabkan *pressure drop (ΔP)* sepanjang aliran. Aliran yang mengalir pada *elbow* mengalami kerugian gesekan (*friction loss*) dan terbentuknya aliran sekunder (*secondary flow*). Seperti halnya pada aliran yang mengalir dalam pipa lurus yang mengalami kerugian separasi (*separation loss*).

Model penelitian dalam studi numerik ini berupa *square ducting* terdiri *upstream straight channel* yang tersambung *square elbow 90⁰*. Pada bagian setelah *elbow 90⁰* terdapat *downstream straight channel* sepanjang $x/D_h=18$ dengan *damper* yang terletak di dalamnya sepanjang $x/D_h=2$. Fluida kerja penelitian adalah udara yang mengalir secara *steady, incompressible fluid, fully develop* dan mempunyai kondisi aliran *uniform* disisi *inlet* dengan $Re=7,88 \times 10^4$ dan *damper 30° CW* dan *30° CCW*.

Hasil penelitian numerik akan diperoleh profil kecepatan secara dua dimensi, vektor kecepatan pada setiap *cross section, pressure drop (ΔP)* di sepanjang *ducting system* yang ditambahkan *single guide vane*.

Kata kunci: *ducting, elbow 90°, friction loss, pressure drop (ΔP), dan secondary flow.*

NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90⁰ WITH SINGLE GUIDE VANE IN OPENING DAMPER VARIATION

Name : Imam Nur Fachrudin
NRP : 2114 105 030
Department : S1 Teknik Mesin FTI - ITS
Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

ABSTRACT

Piping system installation is always has a component called fittings (accessories), which has a coefficient of losses (total headloss) and cause the pressure drop (ΔP) throughout the flow. That is because the stream that flows at the elbow suffered losses due to friction (friction loss) and the formation of secondary flow. Similar as the stream flowing in the straight pipes that suffered losses as a result of separation (separation loss).

Experimental model that used in this numerical study is square ducting in the form of straight upstream channel that connected in square elbow 90⁰. In section after elbow 90⁰, there are downstream straight channel along the $x/D_h=18$ with a damper located inside along the $x/D_h=2$. The working fluid that used in the simulation test is flowing air at steady, incompressible fluid, fully develop and have a uniform flow conditions in the inlet side with $Re=7.88 \times 10^4$ two damper is 30° CW and 30° CCW.

Numerical research results will be obtained in a two-dimensional velocity profile, the velocity vector at each cross section, pressure drop (ΔP) along the ducting system that added single guide vane.

Keywords: *ducting, elbow 90°, pressure drop (ΔP), friction loss dan secondary flow.*

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II LANDASAN PUSTAKA	7
2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	7
2.2 Bilangan Reynolds	8
2.3 Aliran di Dalam Pipa.....	9
2.3.1 Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran.....	9
2.3.2 Mekanisme Terjadinya Aliran Sekunder Di Dalam Elbow	11
2.4 Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran dengan <i>Butterfly Valve</i> sebagai Bodi Pengganggu.....	13
2.5 Penelitian Aliran Prediksi CFD dan Perbandingan Eksperimen dari Bentuk <i>guide vane</i> (gv) di dalam <i>Elbow 90°</i>	14
2.6 Karakteristik Aliran Melalui <i>Rectangular Duct</i> dengan <i>Elbow 90°</i>	16
2.7 Penelitian Simulasi Aliran Tiga Dimensi Melalui <i>Rectangular Duct</i> Dengan Variasi Bukaannya <i>Damper</i>	19
2.8 <i>Grid Independency</i>	21
2.9 Model Turbulensi	21
2.10 Perbandingan Berbagai Model Turbulensi pada Bend	22

2.11 Kondisi Batas	23
--------------------------	----

BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... 25

3.1 Geometri Ducting	25
3.2 Metode Numerik.....	26
3.2.1 Tahap <i>Pre-processing</i>	27
3.2.2 Tahap <i>Post-processing</i> Menggunakan Piranti Lunak Simulasi CFD Komersial	28
3.2.3 Meshing Yang Dilakukan pada Penelitian Numerik.....	30
3.2.4 Model 3D Ducting dari Penelitian Numerik.....	31
3.3 <i>Flowchart</i> Penelitian Numerik.....	32
3.4 <i>Grid Independency</i> pada <i>Square Ducting Damper</i> 0^0 dan adanya <i>Single Guide Vane (GV)</i> di dalam <i>Elbow</i> 90^0	33
3.4.1 Ploting Grafik untuk <i>Grid Independency</i>	33
3.4.2 Grafik <i>velocity profile</i> pada titik $y = 0$; $x/D_h = 1,25$ (Jumlah <i>meshing</i> = 544600)	34
3.4.3 Grafik <i>velocity profile</i> pada titik $z = 0$; $x/ D_h = 1,25$ (Jumlah <i>meshing</i> = 544600)	34
3.5 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	35

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN 37

4.1 Perbandingan Profil Kecepatan (<i>velocity profile</i>) Antara Buka-an Sudut <i>Damper</i> $\theta=30^0$ CW dan $\theta = 30^0$ CCW tanpa <i>guide vane</i> (gv) Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	37
4.2 Perbandingan Vektor Kecepatan (<i>velocity vector</i>) Antara Buka-an Sudut <i>Damper</i> $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW tanpa <i>guide vane</i> (gv)	46
4.3 Perbandingan Profil Kecepatan (<i>velocity profile</i>) Antara Buka-an Sudut <i>Damper</i> $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW dengan <i>guide vane</i> (gv) Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	48
4.4 Perbandingan Vektor Kecepatan (<i>velocity vector</i>) Antara Buka-an Sudut <i>Damper</i> $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW dengan <i>guide vane</i> (gv)	56

4.5 <i>Pressure Drop</i> (ΔP) pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow</i> 90° Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	58
4.6 Perbandingan Profil Kecepatan dan Vektor Kecepatan <i>Outlet Elbow</i> 90° dengan Variasi Bukaannya Sudut <i>Damper</i> Antara Inlet 0° , 30° CW Dan 30° CCW dengan <i>Guide Vane</i> (gv) Saat $Re = 7,88 \times 10^4$	59

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 67

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian.....	67
5.2 Saran.....	68

DAFTAR PUSTAKA

BIODATA PENULIS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Error</i> dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° <i>rectangular bend</i> pada masing-masing pemodelan turbulensi (Nur Ikhwan, 2009)	22
Tabel 3.1	<i>Grid independency</i> dari jumlah meshing yang berbeda-beda (pada $y=0$ dan $x=1,25$)	33
Tabel 3.2	Prosentase <i>Error</i> pada titik referensi 0 pada <i>cross section</i> $x/D_h = 10$	33
Tabel 3.3	Jadwal Pelaksanaan Penelitian	35
Tabel 4.1	<i>Pressure Drop</i> (ΔP) <i>Square Duct</i> dengan beberapa variasi bukaan sudut <i>damper</i> tanpa dan dengan <i>guide vane</i> (<i>gv</i>)	58

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i> (Fox et al, 2010).....	7
Gambar 2.2 Separasi aliran pada <i>curved pipe</i> (Cheng : 1994)	11
Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan (Miller :1990)	12
Gambar 2.4 Aliran Sekunder (Miller: 1990)	12
Gambar 2.5 <i>Test Section</i> serta posisi <i>valve</i> $x/D_h=1$ dan sudut α (Danbon dan Sollicec : 2000)	13
Gambar 2.6 Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran :	
a.) dengan <i>elbow</i> pada sudut $\alpha=0^\circ$	13
b.) dengan <i>elbow</i> pada sudut $\alpha=30^\circ$ (Danbon dan Sollicec 2000)	14
Gambar 2.7 <i>Duct layout</i> (Moujaes dan Aekula : 2009).....	15
Gambar 2.8 Perbandingan visualisasi <i>countur velocity magnitude</i> dengan dan tanpa <i>guide vane</i> (Moujaes dan Aekula : 2009).....	15
Gambar 2.9 <i>Loss coefficient</i> fungsi bilangan <i>Reynolds</i> sebagai hasil komparasi dari simulasi numerik dengan kajian eksperimental untuk konfigurasi yang sama.....	16
Gambar 2.10 a) Posisi pengambilan data pada <i>domain</i> uji b) Mesh pada <i>Volume</i> (Rup dan Sarna : 2011)	17
Gambar 2.11 Perbandingan profil kecepatan didapat dari :	
a.) simulasi dan eksperimen Untuk $\phi=30^\circ$ ($z/D_h=0.0$).	
b.) simulasi dan eksperimen untuk $\phi=60^\circ$ ($z/D_h=0.0$).	
c.) simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h=1.0$ dan $z/D_h=0.0$. (Rup dan Sarna : 2011)	18
Gambar 2.12 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen (Rup dan Sarna : 2011)	18
Gambar 2.13 Geometri <i>Ducting</i> tampak bawah	

(Edgar : 2016)	19
Gambar 2.14 Penempatan posisi <i>cross-section</i> (Edgar : 2016)	20
Gambar 2.15 Perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan sepanjang aliran untuk $Re=2.05 \times 10^5$ (Edgar : 2016)	20
Gambar 3.1 Geometri <i>ducting</i> berdasarkan panjang D_h	26
Gambar 3.2 Model geometri <i>ducting</i>	27
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> pada <i>square ducting</i>	30
Gambar 3.4 Domain model kondisi batas <i>ducting</i>	31
Gambar 3.5 Domain posisi sudut <i>damper</i> pada $x/D_h=2$ dan bentuk penampang <i>damper</i>	32
Gambar 3.6 <i>Flowchart</i> penelitian numerik <i>square duct</i>	32
Gambar 3.7 <i>Grid independency</i> jumlah <i>meshing</i> Vs U_{max}	33
Gambar 3.8 Grafik <i>velocity profile</i> pada titik $y=0$; $x/D_h=1,25$ (Jumlah <i>meshing</i> = 544600)	34
Gambar 3.9 Grafik <i>velocity profile</i> pada titik $z=0$; $x/D_h=1,25$ (Jumlah <i>meshing</i> = 544600)	34
Gambar 4.1 Penampang vektor kecepatan di setiap <i>cross-section</i> <i>damper</i> 30^0 CW dan 30^0 CCW tanpa <i>guide vane</i>	39
Gambar 4.2 Perkembangan <i>velocity profile</i> bukaan <i>damper</i> 30^0 CW dan 30^0 CCW tanpa <i>guide vane</i> tampak atas	39
Gambar 4.3 Perkembangan <i>velocity profile</i> bukaan <i>damper</i> 30^0 CW dan 30^0 CCW tanpa <i>guide vane</i> tampak depan	40
Gambar 4.4 Grafik antara <i>Inlet</i> ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CW dan <i>damper</i> 30^0 CCW tanpa <i>guide vane</i> dilihat dari tampak atas	42
Gambar 4.5 Grafik antara <i>Inlet</i> ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CW dan <i>damper</i> 30^0 CCW tanpa <i>guide vane</i> dilihat dari tampak depan	44
Gambar 4.6 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CW tanpa <i>guide vane</i>	46

Gambar 4.7 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CCW tanpa <i>guide vane</i>	47
Gambar 4.8 Penampang vektor kecepatan di setiap <i>cross-section</i> <i>damper</i> 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i>	49
Gambar 4.9 Perkembangan <i>velocity profile</i> bukaan <i>damper</i> 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i> tampak atas	50
Gambar 4.10 Perkembangan <i>velocity profile</i> bukaan <i>damper</i> 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i> tampak depan	50
Gambar 4.11 Grafik antara <i>Inlet</i> ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CW dan <i>damper</i> 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i> dilihat dari tampak atas	52
Gambar 4.12 Grafik antara <i>Inlet</i> ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CW dan <i>damper</i> 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i> dilihat dari tampak depan	54
Gambar 4.13 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CW dengan <i>guide vane</i>	56
Gambar 4.14 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut <i>damper</i> 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i>	57
Gambar 4.15 Visualisasi profil kecepatan <i>outlet elbow</i> 90^0 pada <i>section</i> $x/D_h=0$ bukaan sudut <i>damper</i> antara <i>Inlet</i> 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i>	60
Gambar 4.16 Visualisasi profil kecepatan <i>outlet elbow</i> 90^0 pada <i>section</i> $x/D_h=0$ bukaan sudut <i>damper</i> antara <i>Inlet</i> 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i>	61
Gambar 4.17 Visualisasi profil kecepatan <i>outlet elbow</i> 90^0 pada <i>section</i> $x/D_h=18$ bukaan sudut <i>damper</i> antara <i>Inlet</i> 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i>	63
Gambar 4.18 Visualisasi profil kecepatan <i>outlet elbow</i> 90^0 pada <i>section</i> $x/D_h=18$ bukaan sudut <i>damper</i> antara <i>Inlet</i> 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan <i>guide vane</i>	64

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Instalasi atau sistem perpipaan merupakan instalasi yang sangat memegang peranan penting guna mendukung sebagian besar proses yang ada di Industri, seperti yang kita ketahui pada pembangkit listrik, kilang minyak, distribusi gas alam, sistem pengkondisian udara, dan lain-lain. Dalam sistem perpipaan selalu ada komponen yang disebut *fitting* (aksesoris), yang mempunyai koefisien *losses* dan menyebabkan *pressure drop* sepanjang aliran. Pada aplikasi tertentu diperlukan suatu sistem distribusi guna mengalirkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain. Sepanjang sistem tersebut terdapat saluran pembelokan (*elbow*), semakin banyak belokan disepanjang saluran maka akan timbul kerugian energi (*losses energy*) yang semakin besar pula yang digunakan untuk mengalirkan fluida. Pada aplikasi tertentu yang menghendaki adanya pengaturan laju aliran massa, maka aliran tersebut pasti akan melewati suatu gangguan yang mungkin dapat menambah kerugian energi, artinya diperlukan energi yang besar untuk menanggulangi setiap kerugian yang terjadi di sepanjang instalasi.

Nilai *pressure drop* aliran yang mengalir pada *elbow* lebih besar daripada aliran yang mengalir pada saluran pipa lurus dengan panjang yang sama. Hal tersebut dikarenakan aliran yang mengalir pada *elbow* mengalami kerugian akibat gesekan (*friction loss*) seperti halnya pada aliran yang mengalir dalam pipa lurus dan juga mengalami kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan *secondary flow*. Separasi terjadi akibat perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut sehingga aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* (*apg*) yang mengakibatkan aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya dan membentuk *vortex*. Sedangkan aliran sekunder (*secondary flow*)

terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner wall* dan *outer wall*. Perbedaan tekanan ini terlihat pada distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar dibanding sisi *inner wall*, sehingga memungkinkan partikel fluida *outer wall* bergerak menuju *inner wall*. Gerakan partikel ini menyebabkan laju aliran fluida terhambat. *Pressure drop* yang terjadi pada suatu aksesoris tambahan suatu instalasi akan berpengaruh pada aliran di dalamnya, akibatnya akan memberikan nilai koefisien tertentu sesuai sudut bukaan.

Salah satu usaha untuk mengurangi kerugian aliran di dalam *elbow* adalah dengan menambahkan sudu pengarah (*guide vane*). Hal ini bertujuan untuk mengurangi *separation loss* yang terjadi karena *guide vane* dapat membuat aliran lebih mampu mengikuti kontur permukaan, dan diharapkan dapat mengurangi terbentuknya *secondary flow*. Namun di sisi lain penambahan *guide vane* dapat meningkatkan *friction loss* sehingga *pressure drop* belum tentu berkurang.

Danbon dan Sollic (2000) melakukan eksperimen pada pipa lurus dan ditambahkan dengan *elbow* 90° berpenampang lingkaran (*circular pipe*) yang di dalamnya ditambahkan *butterfly valve*. Pada pipa berpenampang lingkaran memiliki diameter 0,3 m dan untuk panjang pipa *downstream* sebesar $x=11D_h$. Pengambilan data bilangan *Reynolds* dengan rentang $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$, dilakukan dengan tambahan *elbow* 90° dan *butterfly valve* yang di-*setting* kemiringan 0° (*fully open*) dan 30°. Hasil yang didapat melalui grafik profil kecepatan pada pipa lurus yang terdapat *butterfly valve* bahwa aliran akan mencapai *fully developed* lebih awal dari pada pipa lurus yang ditambahkan *elbow*, hal ini disebabkan karena pada *elbow* tersebut sudah terjadi aliran sekunder sebelum melalui *butterfly valve*.

Penelitian yang dilakukan oleh **Rup dan Sarna** (2011) adalah melakukan perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen. Simulasi ini dilakukan pada $Re = 40000$ menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*)

dengan variasi tiga kerapatan *mesh* yaitu $V_k=553\ 052$; $V_k=1766\ 079$ dan $V_k=1034\ 775$, menghasilkan data berupa grafik profil kecepatan untuk lokasi $x/D_h=1.0$ terdapat perbedaan signifikan pada masing-masing variasi kerapatan *mesh* dan yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada jumlah mesh 1034 775.

Simulasi numerik dengan perangkat lunak STAR-CD dilakukan oleh **Moujaes & Aekula (2009)** yang mengevaluasi perbedaan *pressure drop* pada *elbow* 90^0 dengan dan tanpa *guide vane* berpenampang *rectangular duct* pada berbagai variasi bilangan *Reynolds*. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan tiga belas (13) bilangan *Reynolds* pada rentang $1 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$. Hasil yang diperoleh yaitu perbandingan *loss coefficient* antara hasil simulasi numerik yang dilakukan dengan hasil eksperimen dari Rozell (1974) dan Brooks (1993), menunjukkan kesesuaian antara hasil keduanya.

Penelitian studi numerik yang dilakukan oleh saudara **Edgar (2016)** dalam upaya mengamati dan memperoleh hasil dari profil kecepatan dan vektor kecepatan melalui simulasi fluent pada *rectangular duct* dengan variasi bukaan *damper* di daerah *downstream straight channel*. Pada variasi bukaan *damper* 0^0 dan 30^0 terdapat profil kecepatan yang sangat besar dan tekanan paling kecil yang melewati selah – selah dari *damper* yang menyempit. Penelitian dilakukan menggunakan metode komputasi pada bilangan *Reynolds* sebesar $Re = 2.05 \times 10^5$ dan $Re = 8.2 \times 10^5$. pada sisi *downstream* diletakkan bodi pengganggu berupa *damper* sepanjang $x/D_h=2$.

Setelah terdapat banyak penelitian, maka saya melakukan penelitian lebih lanjut tentang karakteristik aliran melalui penampang *square duct* dengan ditambahkan satu *guide vane* (gv) di dalam *elbow* 90^0 dan diletakkannya sebuah *damper* berjarak $x/D_h=2$ setelah *elbow* dengan variasi bukaan sudut *damper* 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan dan tanpa *guide vane* (gv). Dengan mengacu pada penelitian sebelumnya mulai dari **Danbon dan Sollicc (2000)** sebagai referensi profil kecepatan

aliran di dalam penampang, dan dari penelitian **Moujaes & Aekula (2009)** yaitu untuk mencari dan mengevaluasi perbedaan *pressure drop* (ΔP) pada *elbow* 90° dengan dan tanpa *guide vane* (gv). Untuk penelitian **Rup dan Sarna (2011)** untuk mengetahui model profil kecepatan yang melewati elbow pada penampang *rectangular duct*. Penelitian **Edgar (2016)** sebagai referensi tentang aliran yang melewati suatu penampang *rectangular duct* dan pada sisi *downstream straight channel* yang ditambahkan *damper* sepanjang $x/D_h=2$.

1.2 Rumusan Masalah

Suatu aliran fluida pada saluran berpenampang yang melewati celah sempit selalu mengalami *pressure drop*, separasi aliran, dan aliran sekunder. Pada aliran yang melewati suatu gangguan, maka akan terjadi perubahan profil kecepatan. Terbentuknya *pressure drop* dan *secondary flow* pada saluran berpenampang yang terjadi di dalam aliran internal yang melewati suatu gangguan. Salah satu usaha untuk mengurangi kerugian aliran di dalam *elbow* adalah dengan menambahkan sudu pengarah (*guide vane*). Hal ini bertujuan untuk mengurangi *separation loss* yang terjadi karena *guide vane* dapat membuat aliran lebih mampu mengikuti kontur permukaan, dan diharapkan dapat mengurangi terbentuknya *secondary flow*. Namun di sisi lain penambahan *guide vane* dapat meningkatkan *friction loss* sehingga *pressure drop* belum tentu berkurang.

Rumusan masalah dari penelitian yang dilakukan yaitu :

1. Bagaimana pengaruh *guide vane* (gv) di dalam *elbow* 90° dan bukaan sudut *damper* terhadap *pressure drop* pada daerah *downstream straight channel* ?
2. Bagaimana profil kecepatan (*velocity profile*) sepanjang aliran yang ditambahkan satu *guide vane* (gv) pada daerah *downstream straight channel* sebelum melewati *damper*?

3. Bagaimana visualisasi aliran pada posisi setelah *damper* yang ditambahkan satu *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 ?
4. Bagaimana vektor kecepatan (*velocity vector*) pada *isosurface* $x/D_h=0$ setelah ditambahkan satu *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini yaitu untuk mengetahui karakteristik aliran yang melalui penambahan *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 dan gangguan yang diletakkan pada jarak x/D_h di saluran *square duct*, adapun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui dan menganalisa pengaruh *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 dan bukaan *damper* terhadap *pressure drop* pada daerah *downstream straight channel*.
2. Mengetahui profil kecepatan (*velocity profile*) sebelum *elbow*, pada *elbow*, dan setelah *elbow* dengan dan tanpa satu *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 .
3. Mengetahui visualisasi aliran pada posisi setelah *damper* yang ditambahkan satu *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 .
4. Mengetahui vektor kecepatan (*velocity vector*) pada *isosurface* $x/D_h=0$ untuk membuktikan bahwa dengan penambahan *guide vane* (*gv*) aliran sekunder menjadi lebih kecil.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar dari tujuan awal. Batasan masalah dari penelitian ini mulai dari :

1. Pemodelan benda uji dilakukan dengan *software* Gambit 2.4.6 untuk tahap *Pre-processing* dan Fluent 6.3.26 untuk *Post processing*.

2. Fluida yang mengalir adalah udara pada kondisi aliran *uniform* pada sisi *inlet*, *incompressible flow*, *steady* dan *fully developed*.
3. Perpindahan panas permukaan *square duct* dapat diabaikan.
4. Kecepatan konstan yang digunakan sebesar $v=10$ m/s dengan bilangan *Reynolds* sebesar $7,88 \times 10^4$.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang melewati suatu saluran berpenampang persegi (*square duct*) yang ditambahkan dengan dan tanpa satu *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 dan diletakkan bodi pengganggu (*damper*).
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh variasi sudut kemiringan bodi pengganggu (*damper*) terhadap karakteristik aliran yang ditambahkan satu *guide vane* (*gv*) di dalam *elbow* 90^0 .

BAB II

LANDASAN PUSTAKA

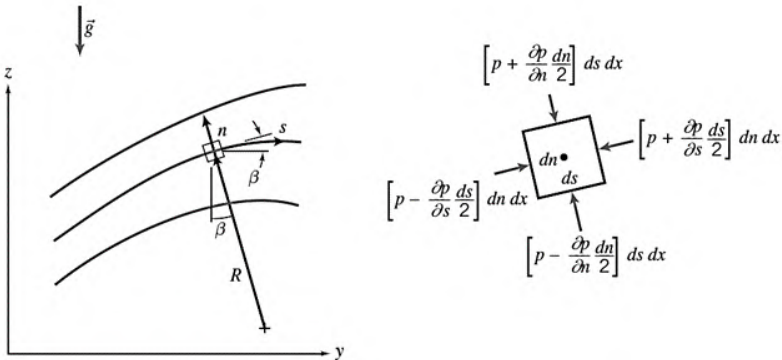
2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Suatu aliran yang mengalir di dalam penampang akan memiliki suatu kondisi dimana aliran itu secara *steady* terdapat satu *streamline* pada tiap-tiap kecepatan yang bergerak. Dalam aliran *steady* sebuah partikel fluida yang bergerak di sepanjang aliran *streamline* tidak akan menyinggung atau memotong garis aliran *streamline*. Hal ini membuat *streamline* seakan-akan menjadi suatu batas padat yang tidak bisa ditembus oleh aliran itu sendiri.

Persamaan Euler diperoleh persamaan gerak yang dinyatakan dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$

Gambar 2.1 dapat diketahui gerakan partikel fluida aliran pada garis *yz*. Persamaan gerak dituliskan dalam koordinat *s* (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat *n* (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari element adalah *p*.



Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline*
(Fox et al, 2010)

Untuk *steady flow* dan mengabaikan *body forces*, persamaan Euler di sepanjang *streamline* ke arah s dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) tersebut menunjukkan hubungan antara kecepatan dengan tekanan, yang mana apabila terjadi penurunan kecepatan maka terjadi peningkatan tekanan, begitu pula sebaliknya. Hal ini sangat sesuai dengan hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa apabila suatu aliran yang ideal tanpa gesekan yang dijumlahkan antara komponen tekanan dan kecepatan pada setiap titik, maka hasilnya adalah sama.

Pada kondisi *steady flow* dimana R adalah kelengkungan dari *streamline*, maka persamaan Euler normal dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.3)$$

Untuk persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) menunjukkan terjadinya peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkungan *streamline*. Hal ini dapat terjadi karena gaya yang bekerja pada partikel hanyalah gaya dari tekanan, medan tekanan menyebabkan percepatan sentripetal. Pada daerah *streamline* yang lurus atau dengan radius kelengkungan (R) tak terhingga maka tidak ada perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline* lurus.

2.2 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* merupakan salah satu faktor dalam proses terbentuknya suatu aliran. Semakin besar bilangan Reynolds, maka aliran yang terbentuk akan semakin turbulen (berolak). Aliran turbulen memiliki bentuk lebih tidak beraturan atau menumpuk (*blunt*) dibandingkan dengan aliran laminar, sehingga momentum aliran turbulen di dekat dinding lebih besar.

Hal ini mengakibatkan aliran lebih tahan terhadap tegangan geser dan *adverse pressure gradient* (apg). Persamaan bilangan *Reynolds* dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.5)$$

dengan, ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
 U_{ref} : *central velocity* fluida pada *inlet test section* (m/s)

D_h : diameter hidrolik (m)

μ : viskositas kinematis fluida (N.s/m^2)

Untuk mencari Diameter hidrolik (D_h) yaitu dengan membagi luas penampang (A) dengan keliling (P) bidang yang diukur, dalam penelitian ini berupa *ducting* yang berbentuk persegi.

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

dimana; D_h : Diameter hidrolik (m)

A : Luas penampang bidang (m^2)

P : keliling bidang (m)

2.3 Aliran di Dalam Pipa

Pada sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan juga *secondary flow*. Akan dijelaskan lebih lanjut tentang mekanisme terjadinya separasi dan *secondary flow* di dalam *elbow*.

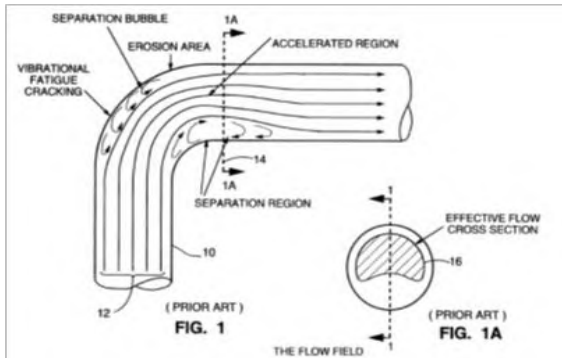
2.3.1 Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran

Separasi aliran didalam *square elbow* disebabkan karena terbentuknya *adverse pressure gradient* (apg) atau kenaikan tekanan pada dinding *elbow* baik *inner wall* maupun *outer wall*. Proses terjadinya separasi berawal dari aliran yang melintasi *square elbow* 90° melawan gaya gesek pada dinding *elbow* ditambah dengan adanya kenaikan tekanan (*adverse pressure gradient*). Kenaikan tekanan pada sisi *outer wall elbow* disebabkan oleh radius kelengkungan *elbow*. Semakin besar

radius kelengkungan *elbow*, maka kenaikan tekanan akan semakin besar. Gesekan antara dinding *elbow* dan partikel fluida dapat mengurangi momentum aliran ketika melintas di sepanjang *elbow* dikarenakan fluida yang mengalir harus melawan tegangan geser, sehingga ketika melewati *adverse pressure gradient* (apg) aliran akan terseparasi (*separation loss*).

Sedangkan separasi aliran pada *inner wall* disebabkan oleh gaya inersia yang terjadi. Hal ini akan terbentuk *adverse pressure gradient* (apg) pada *inner wall* yang mengakibatkan aliran akan terseparasi. Akibat separasi aliran akan berbalik arah dari aliran utamanya (*backflow*). Karena aliran ini mempunyai momentum yang rendah, maka aliran ini akan terjebak dan terbentuklah *vortex flow* pada sisi *corner elbow*. *Vortex* merupakan aliran yang terjebak dan berpusar-pusar diantara aliran utama dan dapat mengurangi energi aliran sehingga memberikan pengaruh terhadap timbulnya *pressure drop*. *Vortex* pada *square elbow* 90° terjadi akibat adanya interaksi *boundary layer* dan *end wall* yang berkembang pada dinding. Terjadinya separasi aliran pada sisi *inner* dan *outer wall* serta *vortex* pada sisi sudut akan menimbulkan *blockage effect* dan menyebabkan luas penampang aliran utama (*effectiveness flow area*) pipa akan mengecil. Timbulnya *blockage effect*, *secondary flow* pada *corner* dan *surface roughness* merupakan penyebab terjadinya *pressure drop* pada aliran.

Penelitian tentang separasi aliran di dalam *elbow* pernah dilakukan oleh **Cheng (1994)** dengan menginjeksikan cairan berwarna pada pipa transparan untuk memperoleh ilustrasi visualisasi *streamline* di dalam *elbow*. Kemudian diambil gambarnya menggunakan *square elbow* seperti yang terlihat pada gambar 2.2.

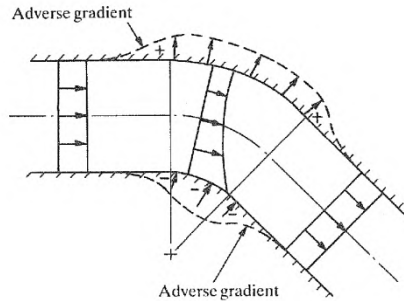


Gambar 2.2 Separasi aliran pada *curved pipe*
(Cheng : 1994)

Pada gambar 2.2 terlihat terjadi separasi aliran di sisi *inner wall* maupun *outer wall elbow*. Pada *outer wall* terjadi kenaikan tekanan didekat *inlet elbow* yang menyebabkan aliran terseparasi (*separation loss*). Begitu juga pada sisi *inner wall*, terjadi kenaikan tekanan di dekat *outlet elbow*. Separasi aliran yang terjadi pada sisi *inner wall* dan *outer wall* ini membuat *effective flow area* berkurang.

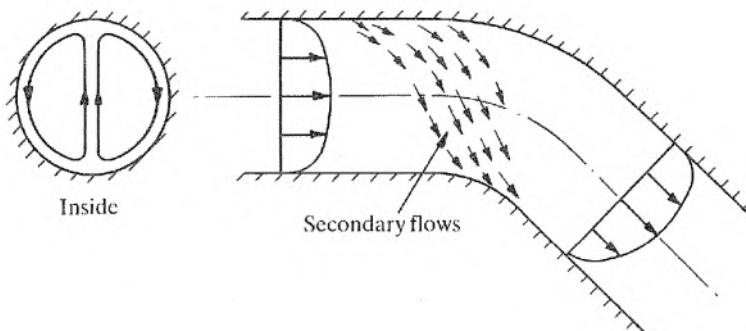
2.3.2 Mekanisme Terjadinya Aliran Sekunder Di Dalam *Elbow*

Aliran yang melalui penampang *elbow* tentunya akan berubah arah aliran, begitu pula dengan tekanan statis dan distribusi kecepatan akan berubah, setidaknya dua *adverse pressure gradient* (apg) akan timbul seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Setelah itu aliran sekunder akan muncul dan lengkungan akan menyebabkan turbulensi pada struktur aliran.



Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan
(Miller : 1990)

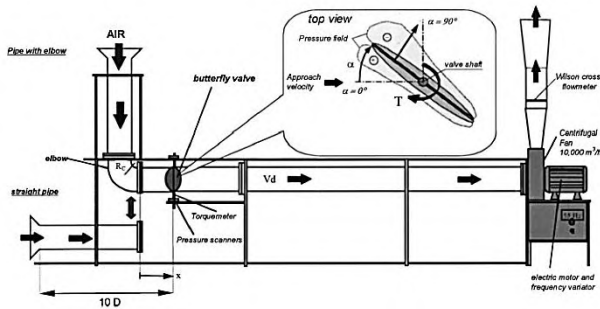
Pada *fitting* berupa *elbow* kecepatan bervariasi dari nol pada dinding hingga maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui penampang belok melibatkan distribusi energi yang tidak *uniform*. Pada daerah *elbow* inilah perbedaan tekanan yang menyebabkan aliran tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama, karena tekanan statis pada sisi *outer wall* lebih besar dibanding sisi *inner wall*. Maka terbentuklah aliran sekunder (*secondary flow*). Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.4.



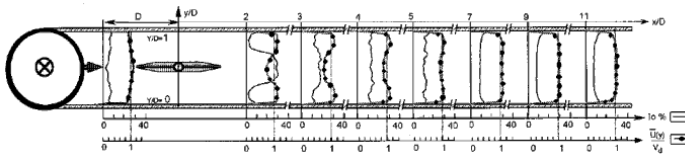
Gambar 2.4 Aliran Sekunder
(Miller : 1990)

2.4 Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran Dengan *Butterfly Valve* Sebagai Bodi Pengganggu

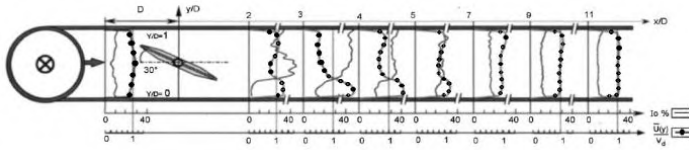
Danbon dan Sollicc (2000) melakukan eksperimen pada saluran penampang *circular* yang di dalamnya diletakkan *butterfly valve* sebagai pengontrol laju aliran fluida. Eksperimen dilakukan pada kecepatan 40 m/s dan intensitas turbulen 2%, *valve* diletakkan di posisi $x/D_h=1$ dengan variasi $\alpha = 0^\circ$ dan $\alpha = 30^\circ$ serta bilangan *Reynolds* $5,0 \times 10^4 < Re < 10^6$, seperti yang terlihat pada gambar 2.5. Hasil yang diperoleh yaitu profil kecepatan dan profil intensitas turbulen yang digambarkan berupa *dotlines* dan *solidlines*, seperti yang pada gambar 2.6 (a) dan (b).



Gambar 2.5 Test Section serta posisi valve $x/D_h=1$ dan sudut α (Danbon dan Sollicc : 2000)



a.) dengan *elbow* pada sudut $\alpha = 0^\circ$.



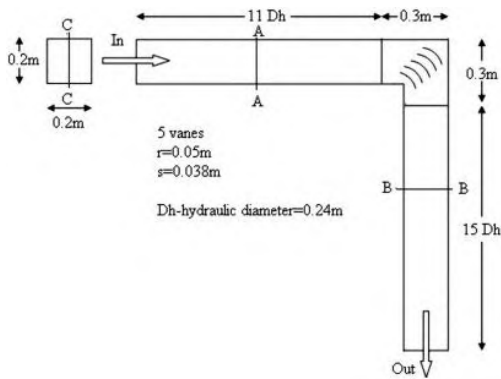
b.) dengan *elbow* pada sudut $\alpha = 30^\circ$.

Gambar 2.6 Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran
(Danbon dan Sollicec : 2000)

Pada gambar 2.6(a) dapat diketahui bahwa saluran dengan *elbow* pada bukaan damper 0° (*fully open*) yang terletak di $x/D_h=1$ pada *centreline* ($y/D_h=0,5$) namun akan berangsur - angsur kembali *fully developed* pada $x/D_h=11$. Sedangkan saluran dengan *elbow* gambar 2.6(b) pada bukaan damper 30° yang terletak di $x/D_h=1$ yang kembali *fully developed* pada $x/D_h=11$.

2.5 Penelitian Aliran Prediksi CFD dan Perbandingan Eksperimen dari Bentuk *guide vane* (gv) di dalam *Elbow* 90°

Simulasi numerik dengan perangkat lunak STAR-CD dilakukan oleh Moujaes dan Aekula (2009) yang mengevaluasi perbedaan *pressure drop* pada *elbow* 90° dengan dan tanpa *guide vane* berpenampang *rectangular duct* pada berbagai variasi bilangan *Reynolds*.



Gambar 2.7 Duct layout
(Moujaes dan Aekula : 2009)

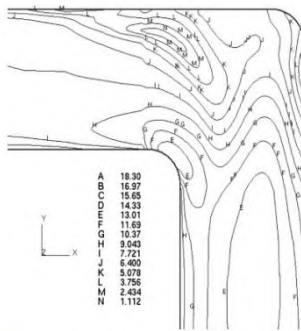


Fig. 6. Velocity magnitude m/s at midplane (C-C) for unvaned elbow at $Re 1.50 \times 10^5$ for $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ model

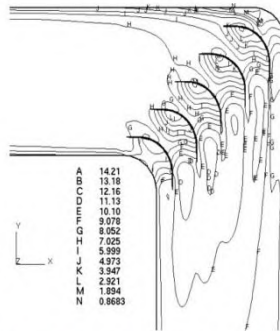
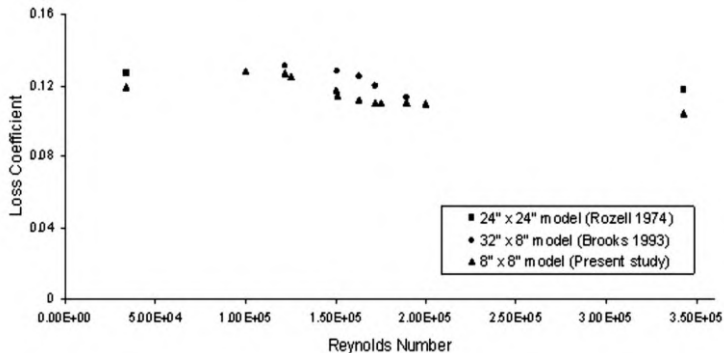


Fig. 7. Velocity magnitude m/s at midplane (C-C) for vaned elbow at $Re 1.50 \times 10^5$ for $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ model

Gambar 2. 8 Perbandingan visualisasi *countur velocity magnitude* dengan dan tanpa guide vane
(Moujaes dan Aekula : 2009)

Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan tiga belas (13) bilangan *Reynolds* pada rentang $1 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$. Pada gambar 2.9. ditunjukkan perbandingan *loss coefficient* antara hasil simulasi numerik yang dilakukan dengan hasil

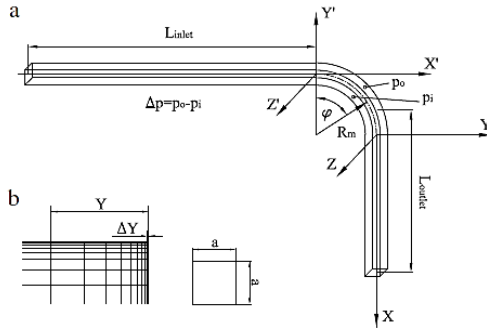
eksperimen dari Rozell (1974) dan Brooks (1993), menunjukkan kesesuaian antara hasil keduanya.



Gambar 2.9 *Loss coefficient* fungsi bilangan *Reynolds* sebagai hasil komparasi dari simulasi numerik dengan kajian eksperimental untuk konfigurasi yang sama.
(Moujaes dan Aekula : 2009)

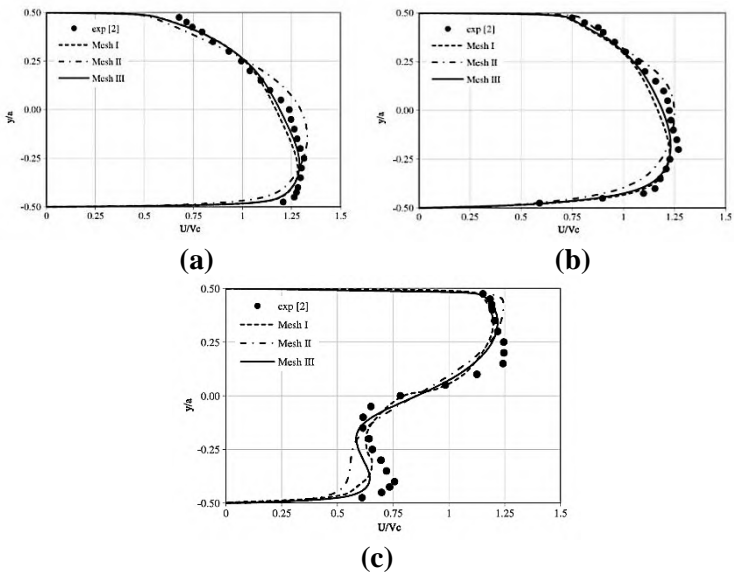
2.6 Karakteristik Aliran Melalui *Rectangular Duct* Dengan *Elbow 90°*

Rup dan Sarna (2011) melakukan penelitian tentang eksperimen dan simulasi *rectangular duct* menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dengan $Re=40000$ pada geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, diameter hidrolis (D_h) = 80 mm dan panjang pipa lurus $L_{in} = L_{out} = 20D_h = 1600$ mm seperti pada gambar 2.7. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553.052$, $V_k = 1.766.079$, and $V_k = 1.034.775$.



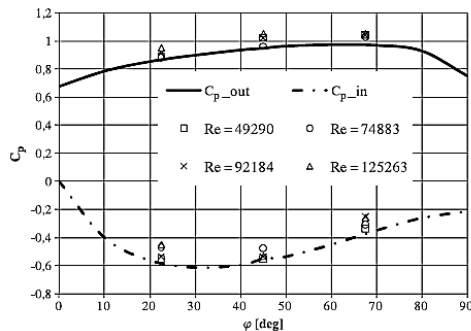
Gambar 2.10 a) Posisi pengambilan data pada *domain* uji
b) Mesh pada *Volume*
(Rup dan Sarna : 2011)

Hasil yang didapatkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*.



Gambar 2.11 Perbandingan profil kecepatan didapat dari :
a.) simulasi dan eksperimen Untuk $\phi = 30^\circ$ ($z/D_h = 0.0$)
b.) simulasi dan eksperimen untuk $\phi = 60^\circ$ ($z/D_h = 0.0$)
c.) simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h=1.0$ and $z/D_h=0.0$
(Rup dan Sarna : 2011)

Pada gambar 2.10 dan 2.11, mendeskripsikan hasil yang didapat dari simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada bukaan katup $\beta=30^\circ$ dan $\beta=60^\circ$. Terdapat perbedaan yang jelas pada gambar 2.11 (c) yang menunjukkan profil kecepatan pada lokasi $x/D_h=1.0$ and $z/D_h=0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1.034.775$).

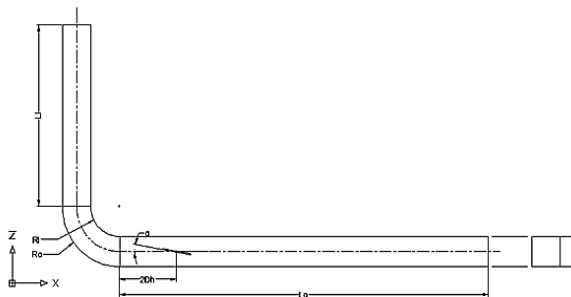


Gambar 2.12 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen.
(Rup dan Sarna : 2011)

Gambar 2.12 merupakan distribusi koefisien tekanan maksimum pada di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\beta = 45^\circ$ ($Z=0.00$). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien *losses* pada *elbow* tersebut.

2.7 Penelitian Simulasi Aliran Tiga Dimensi Melalui *Rectangular Duct* Dengan Variasi Bukaannya Sudut *Damper*

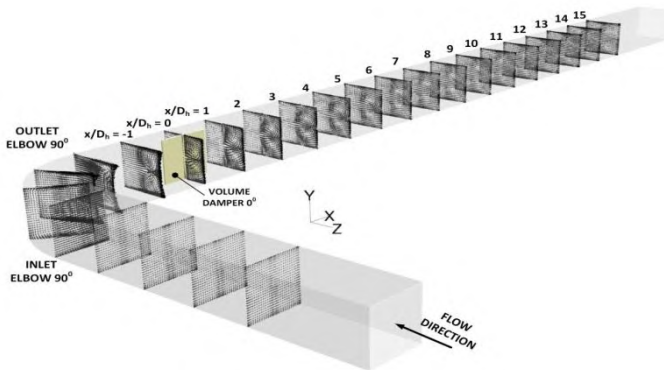
Dalam percobaan simulasi numerik untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct* dengan variasi sudut kemiringan bodi atau bukaan *damper* pengganggu 0° , 10° , 20° dan 30° yang dilakukan oleh saudara **Edgar (2016)**, Referensi nol pada sisi *downstream* terletak di $x/D_h = 2$. Pengambilan data profil kecepatan sisi *downstream* diambil di posisi $x/D_h = -1$ dan $x/D_h = 1$ sampai dengan $x/D_h = 10$. *Properties* fluida yaitu udara dengan *density* (ρ) = $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan *viskositas absolute* (μ) = $1,7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$. Berikut adalah gambar geometri penampang dari *rectangular duct* mulai dari *upstream straight channel*, *elbow* 90° dan *downstream straight channel section* pada gambar 2.13 dan 2.14.



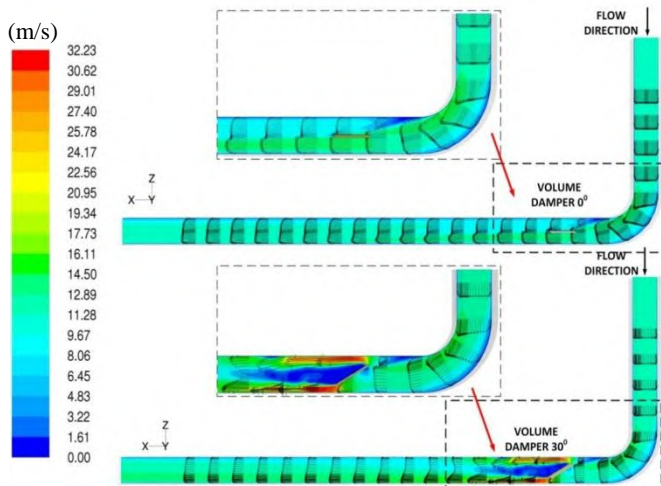
Gambar 2.13 Geometri *Ducting* tampak bawah
(Edgar : 2016)

Profil Kecepatan pada *ducting* dipengaruhi oleh sudut kemiringan *damper* sebagai bodi pengganggu kemudian diamati perkembangan aliran di dalamnya. Distribusi kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U_{max}) dimana u adalah kecepatan lokal pada *section* tersebut dan U_{max} merupakan kecepatan maksimum pada *section* yang sama. Berikut ini akan dibahas perkembangan profil kecepatan (*velocity*

profile) setiap *section* sebagaimana yang tertera pada gambar 2.15.



Gambar 2.14 Penempatan posisi *cross-section*
(Edgar : 2016)



Gambar 2.15 Perkembangan *velocity profile* dan kontur
kecepatan sepanjang aliran untuk $Re = 2.05 \times 10^5$
(Edgar : 2016)

2.8 *Grid Independency*

Dalam melakukan studi numerik mencapai optimal apabila memperhatikan *grid independency*. *Grid independency* merupakan solusi *convergen* yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *meshing*. Jadi dengan meningkatkan jumlah dari sel maka kemungkinan tidak akan mengubah dari *integrated quantities* dan *flow-filed solution*. *Grid independency* diindikasikan dengan menghaluskan *mesh*, hal tersebut terus dilakukan hingga solusi numerik yang dihasilkan sudah tidak berubah secara signifikan.

2.9 Model Turbulensi

Sebuah model turbulensi (*turbulence model*) adalah prosedur komputasi untuk mendekati sistem dari persamaan *mean flow*. Untuk sebagian besar aplikasi di dunia keteknikan, tidaklah perlu untuk melihat hasil detail dari fluktuasi turbulen, yang diperlukan hanyalah untuk mengetahui bagaimana turbulensi memberikan dampak terhadap *mean flow*. Oleh karena itu, *turbulence model* haruslah secara luas dapat diaplikasikan, akurat, sederhana, dan ekonomis untuk dijalankan.

Model $k-\varepsilon$ (k epsilon)

Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga memungkinkan kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model $k-\varepsilon$ (k epsilon) difokuskan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k . Lalu ε (*epsilon*) merupakan laju dissipasi dari k .

a) **Standard $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini menggunakan persamaan *Reynold transport* dalam penyelesaian model untuk k dan ε . Model ini dapat digunakan untuk menyelesaikan *bouyancy*, *heating*, dan *compressibilty*. Model ini tidak sesuai untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream curvature*.

b) **RNG (*Renormalization-group*) $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini merupakan variasi dari model *standard $k-\varepsilon$* . Model ini sesuai

untuk aliran yang mempunyai bilangan *Reynolds* rendah dan untuk memprediksi aliran dengan efek olakan (*swirling*).

- c) **Realizable $k-\varepsilon$** : Pemodelan ini mempunyai beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, namun konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Model ini mempunyai kelebihan yaitu lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran suatu *jet* atau *nozzle*. Dengan menggunakan model ini dapat memberikan performa bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, separasi, *re-circulation*, dan lapisan batas (*boundary layer*) yang mempunyai gradien tekanan yang besar.

2.10 Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada Bend

Nur Ikhwan (2009) telah melakukan komparasi aliran melewati *rectangular elbow* dengan menggunakan model turbulensi *Spallart-Allmaras*, $k-\omega$, $k-\varepsilon$, dan *Reynolds Stress Model* (RSM). **Tabel 2.1** Error dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° *rectangular bend* pada masing-masing pemodelan turbulensi (Nur Ikhwan, 2009)

No	Hasil Eksperimen / Simulasi	% Error
1	Eksperimen (Eddy, 2000)	-
2	Spalart-Allmaras	7,53
3	$k-\varepsilon$ Standard	4.52
4	$k-\varepsilon$ RNG	4,66
5	$k-\varepsilon$ Realizable	4,39
6	$k-\omega$ Standart	5,76
7	$k-\omega$ SST	4,99
8	RSM	4,44

Berdasarkan informasi pada Tabel 2.1, yang menunjukkan nilai *error* pada masing-masing model turbulen, dari kedelapan (8) model turbulensi yang digunakan untuk memprediksi tekanan statis dinding 90° *rectangular bend*, dapat terlihat bahwa yang memiliki hasil paling baik adalah model turbulensi *Realizable $k-\varepsilon$* .

Model *Realizable k- ϵ* dikatakan yang terbaik karena memiliki persentasi *error* yang terkecil, sebab model turbulen tersebut dapat memprediksi aliran sekunder (*secondary flow*) yang terdapat pada masing-masing sudut pada *ducting* sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan model turbulensi yang lain dalam simulasi aliran pada *90° rectangular bend*.

2.11 Kondisi Batas

Berikut ini adalah beberapa kondisi batas yang tersedia dalam piranti lunak simulasi CFD komersial antara lain:

- ***Velocity inlet***

kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, beserta dengan seluruh properti aliran skalar yang relevan pada aliran masuk (*inlet*). Properti total (stagnasi) dari aliran tidak tetap, jadi akan meningkat terhadap nilai apapun yang diperlukan untuk menyediakan distribusi kecepatan yang diinginkan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *incompressible*, kondisi ini berguna dalam aliran *compressible* yang akan mengarahkan ke hasil non-fisik karena kondisi ini mengizinkan kondisi stagnasi pada halangan *solid*, karena hal ini dapat menyebabkan properti *inflow stagnation* menjadi sangat tidak seragam.

- ***Out Flow***

kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar yang mana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum solusi masalah aliran dilakukan. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran *compressible*, aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.

- ***Wall***

Kondisi batas ini digunakan untuk daerah fluida dan padat terikat. Dalam aliran *viscous*, kondisi batas tanpa slip diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi dapat juga

menentukan komponen kecepatan tangensial dalam hal gerakan translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model “*slip*” dinding dengan menentukan gesekan.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini akan membahas mengenai metode penelitian secara numerik dengan menggunakan metode piranti lunak simulasi CFD komersial untuk menganalisis karakteristik aliran tiga dimensi (3D) dalam *square ducting* dengan variasi bukaan sudut *damper* 30° CW dan 30° CCW dengan dan tanpa *guide vane* (gv) yang terletak pada daerah *downstream straight channel* sepanjang $x/D_h=2$ setelah *elbow* 90° dan besar kecepatan pada sisi *inlet* 10 m/s.

Berikut metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Mempelajari dan mencari literatur yang berkaitan dengan tema penelitian, mulai dari mengumpulkan informasi berupa artikel ilmiah, jurnal, *text book*, dan hasil dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

2. Simulasi

Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui fenomena aliran tiga dimensi (3D) sebelum dan sesudah melewati *elbow* 90° dengan dan tanpa *guide vane* (gv). Setelah itu melihat fenomena aliran yang melalui *damper* 30° CW dan CCW dengan dan tanpa *guide vane* (gv). Pada simulasi ini, terdiri dari tiga tahap yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

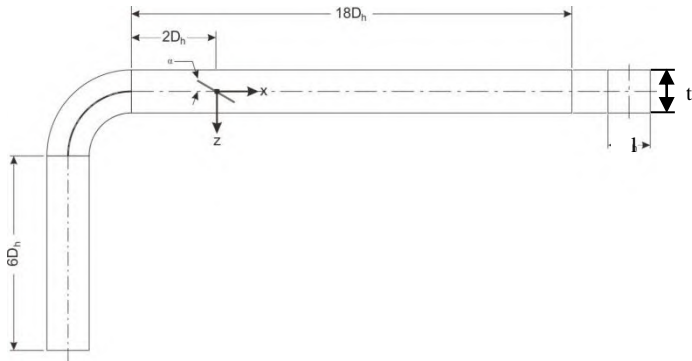
3. Penyusunan Laporan

Laporan ini tersusun atas pendahuluan, landasan pustaka, metodologi penelitian, analisis dari hasil penelitian, kesimpulan dan saran dalam pelaksanaan simulasi yang telah dilakukan.

3.1 Geometri Ducting

Penelitian yang dilakukan menggunakan *ducting* ini memiliki penampang persegi (*square*), dan pada bagian sisi *inlet*

duct terhubung *elbow* 90° , kemudian terpasang juga bodi pengganggu berupa *damper* yang terletak pada jarak $x/D_h = 2$ setelah *elbow* 90° . Geometri *ducting* dan penempatan *damper* diilustrasikan oleh gambar 3.1.



Gambar 3.1 Geometri *ducting* berdasarkan panjang D_h

Spesifikasi dari geometri *ducting* ini adalah sebagai berikut:

- Bentuk Penampang : *Square duct*
- Panjang *upstream straight channel* (L_i) : 750 mm
- Panjang *downstream straight channel* (L_o) : 2250 mm
- Lebar dan tinggi ($l \times t$) : 125 x 125 mm
- *Elbow* 90° Inner radius (r_i) : 125 mm
- *Elbow* 90° Outer radius (r_o) : 250 mm
- *Guide vane 1* radius (r_{gl}) : 187,5 mm
- *Damper* (bodi pengganggu) : 3 x 125 mm
- *Hydraulic diameter* (D_h) : 125 mm

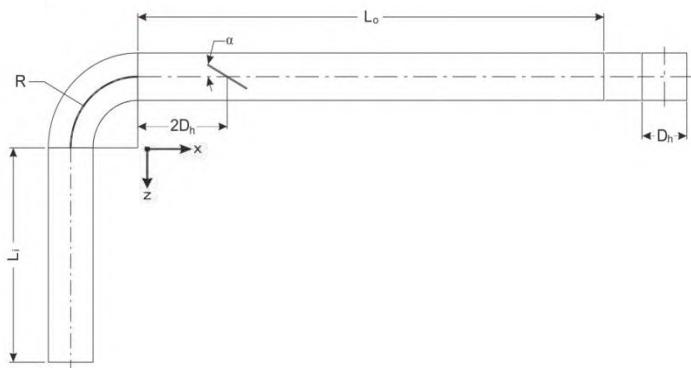
3.2 Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan piranti lunak komputasi fluida (CFD) komersial guna melakukan pendekatan numerik dan membuat geometri model, serta melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada

penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

3.2.1 Tahap *Pre-processing*

- a) Membuat model tiga dimensi berupa *ducting* yang mengacu pada geometri seperti gambar 3.2. Model *ducting* dibuat dalam variasi sudut kemiringan bodi pengganggu (*damper*) sebesar 30° CW dan 30° CCW dengan dan tanpa *guide vane* (gv) di sepanjang *duct*. Dalam penelitian ini, dilakukan penambahan *elbow* 90° pada bagian *inlet* dan penambahan *guide vane* di sisi bagian *elbow* 90° , penambahan tersebut dimaksudkan untuk mendefinisikan profil kecepatan (*velocity profile*) yang telah terpengaruh oleh adanya *elbow* dengan dan tanpa satu *guide vane* (gv) sebelum menuju bodi pengganggu (*damper*).



Gambar 3.2 Model geometri *ducting*

- b) Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi kemiringan bodi pengganggu dan ditambahkannya *guide vane* di dalam *elbow*. *Meshing* dilakukan dengan membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream straight channel*, *elbow*, dan *downstream straight channel*. *Meshing* volume

yang digunakan dengan tipe *Hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan adalah *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada semua sisi di dekat dinding. Hal ini dilakukan sebagai efek adanya *wall function*. Hasil dari *meshing* dan *domain* simulasi diilustrasikan oleh gambar 3.3.

3.2.2 Tahap *Post-processing* Menggunakan Piranti Lunak Simulasi CFD Komersial

a) *Grid*

Langkah pertama yang dilakukan pada *software* simulasi CFD komersial adalah *read* untuk data hasil *meshing*. Kemudian dilakukan *grid checking*. Setelah itu skala ditentukan dalam satuan meter (m).

b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver pressure based*, *unsteady* dan menggunakan model turbulen *k-ε Realizable* berdasarkan penelitian Nur Ikhwan (2009), karena model turbulen ini lebih akurat dibandingkan model turbulensi yang lain. Kelebihan model turbulen ini memiliki persentasi *error* yang terkecil, sebab model turbulen tersebut dapat memprediksi aliran sekunder (*secondary flow*) yang terdapat pada masing-masing sudut pada *ducting*.

c) *Materials*

Data *properties* material fluida yaitu udara pada temperatur ruangan $T = 28^{\circ}\text{C}$ dengan *density* (ρ) $1,2176 \text{ kg/m}^3$ dan *viskositas absolute* (μ) $1,8586 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ dan kecepatan udara yang diberikan sebesar 10 m/s .

d) *Operating Conditions*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 1 atm = 101325 Pa (pascal).

e) *Boundary Conditions*

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji pada *inlet* maupun *outlet*. Daerah *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam (m/s) dan *outlet* didefinisikan sebagai *out flow*. Untuk kondisi batas *upstream straight channel*, *downstream straight channel*, *guide vane (gv)*, *elbow* dan juga *damper* didefinisikan sebagai *wall*, seperti yang tertera pada gambar 3.3.

Inlet yang dimaksud adalah berupa kondisi awal mula fluida memasuki *upstream straight channel*, pada bagian ini *velocity inlet* diatur dengan variasi 10 m/s.

f) *Solution*

Solution pada penelitian ini akan menggunakan *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.

g) *Initialize*

Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai *convergen*, langkah ini dapat dihitung dari *inlet*, *outlet*, atau zona lainnya. Dalam kasus ini langkah awal dimulai dari sisi *inlet duct*.

h) *Monitor Residual*

Pada proses iterasi berlangsung harga kriteria konvergensi ditentukan agar proses iterasi tidak berlangsung terlalu lama. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-6} untuk *continuity* dan 10^{-6} untuk *x-velocity*, *y-velocity*, *z-*

velocity, k dan ε . Hal tersebut berarti proses iterasi dinyatakan telah *convergen* setelah residualnya mencapai nilai yang lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan.

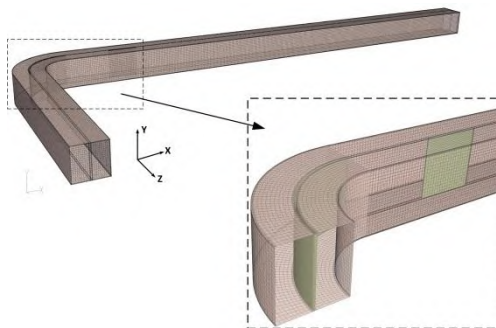
i) *Iterate*

Langkah selanjutnya setelah penetapan harga *monitor residual* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan pada piranti lunak simulasi CFD komersial secara otomatis. *Iterate* akan secara otomatis berhenti apabila semua nilai residualnya mencapai nilai yang lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan, yang disebut juga dengan *convergen*. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai harga *convergence criterion* yang telah ditentukan.

j) *Post - Processing*

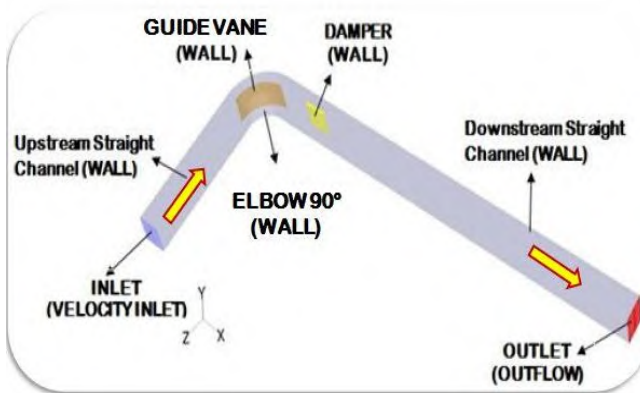
Merupakan penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa profil kecepatan pada sebelum *elbow*, pada *elbow*, setelah *elbow* dengan dan tanpa *guide vane* (gv) dan distribusi nilai grafik kecepatan pada *inner* dan *outer wall* pada *elbow*. Data kualitatif berupa *pathline*, *velocity vector* pada setiap *cross –section*, dan kontur kecepatan.

3.2.3 *Meshing* Yang Dilakukan Pada Penelitian Numerik



Gambar 3.3 *Meshing* pada *square ducting*

3.2.4 Model 3D *Ducting* dari Penelitian Numerik

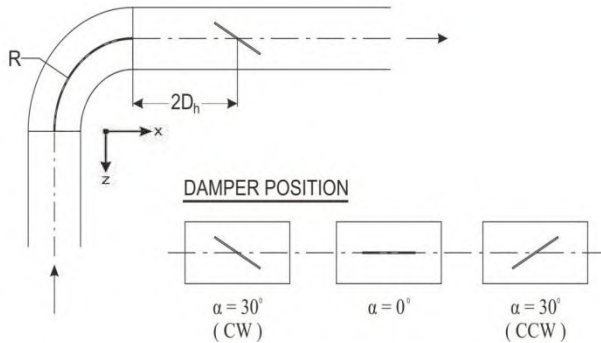


Gambar 3.4 Domain model kondisi batas *ducting*

Bagian – bagian dari model 3D penelitian numerik :

1. *Inlet (velocity inlet)*
2. *Upstream Straight Channel (wall)*
3. *90° Elbow (wall)*
4. *Damper (wall)*
5. *Guide vane (wall)*
6. *Downstream Straight Channel (wall)*, dan
7. *Outlet (outflow)*

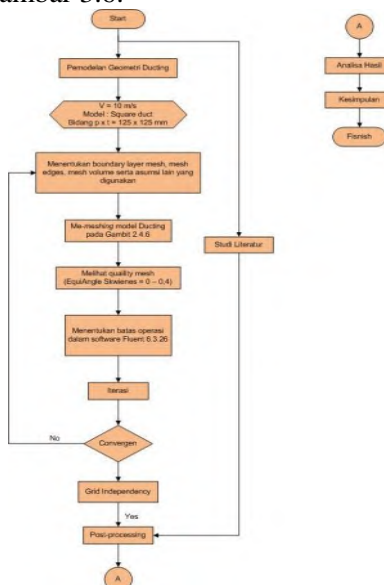
Mengacu dari gambar 3.4 menunjukkan posisi pengambilan data profil kecepatan pada sisi *downstream*, profil kecepatan melewati *guide vane* (gv) dan nilai grafik kecepatan pada *elbow*. Referensi nol pada sisi *downstream straight channel* setelah keluar dari *elbow 90°* yang terletak di $x/D_h=0$. Pengambilan data profil kecepatan sisi *downstream* diambil di posisi $x/D_h=0$ s/d $x/D_h=18$. Pada *elbow*, data diambil di posisi $\alpha = 30^\circ$ CW & $\alpha = 30^\circ$ CCW baik pada sisi *inner* maupun *outer wall* dengan melewati *guide vane* di sepanjang *duct*.



Gambar 3.5 Domain posisi sudut *damper* pada $x/D_h=2$ dan bentuk penampang *damper*

3.3 Flowchart Penelitian Numerik

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *square duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flow chart* yang ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Flow chart penelitian numerik *square duct*

3.4 Grid Independency pada Square Ducting Damper 0° dan adanya Single Guide Vane (GV) di dalam Elbow 90°

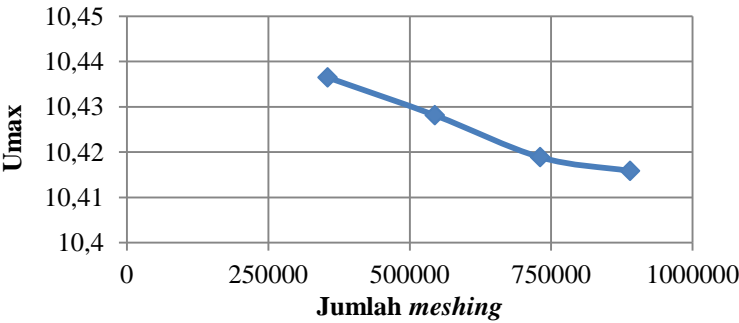
Tabel 3.1 Grid independency dari jumlah meshing yang berbeda-beda (pada y=0 dan x=1,25)

Jenis mesh	Jumlah Meshing	Kecepatan Maksimum Umax (m/s)	Y+ maksimum
Mesh A	(354 872)	10,436	46,064
Mesh B	(544 600)	10,428	44,941
Mesh C	(730 887)	10,418	40,341
Mesh D	(889 548)	10,416	36,722

Tabel 3.2 Prosentase Error pada titik referensi 0 pada cross section $x/D_h = 10$

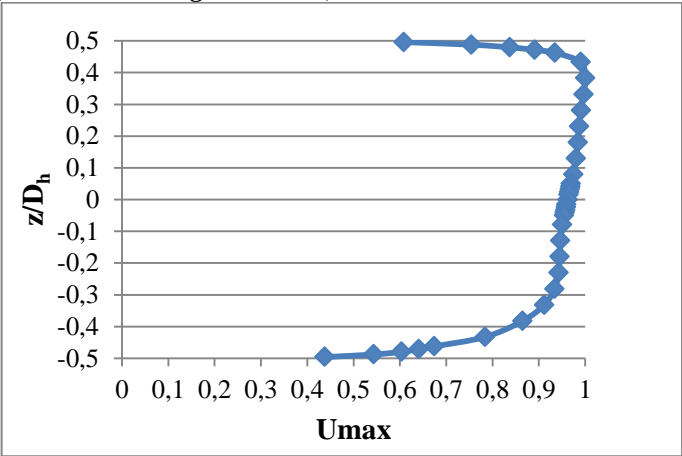
Jenis Mesh	Jumlah Mesh (Nodes)	Umax (m/s)	Error (%)
Mesh A	354 872	10,436	-
Mesh B	544 600	10,428	0,080
Mesh C	730 887	10,418	0,168
Mesh D	889 548	10,416	0,197

3.4.1 Ploting Grafik untuk Grid Independency



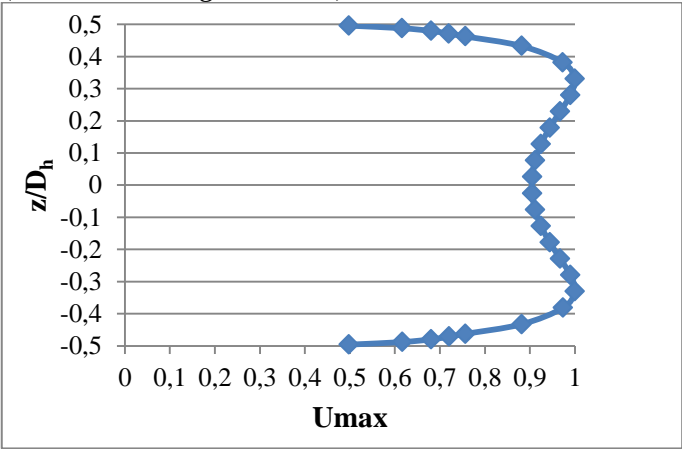
Gambar 3.7 grid independency jumlah meshing Vs Umax

**3.4.2 Grafik *velocity profile* pada titik $y=0$; $x/D_h=1,25$
(Jumlah *meshing* = 544600)**



Gambar 3.8 Grafik *velocity profile* pada titik $y = 0$; $x/D_h = 1,25$
(Jumlah *meshing* = 544600)

**3.4.3 Grafik *velocity profile* pada titik $z=0$; $x/D_h=1,25$
(Jumlah *meshing* = 544600)**



Gambar 3.9 Grafik *velocity profile* pada titik $z = 0$; $x/D_h = 1,25$
(Jumlah *meshing* = 544600)

3.5. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini merupakan jadwal dari langkah penelitian dan langkah pengambilan data seperti yang tertera pada **Tabel 3.3** Jadwal Pelaksanaan Penelitian.

No	Kegiatan	Bulan																							
		1				2				3				4				5				6			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Pustaka																								
2	Pembuatan model Uji																								
3	Pembuatan Meshing Gambit																								
4	Iterasi Fluent																								
5	Postprocessing data																								
6	Penulisan Bab 1-3																								
7	Seminar Proposal																								
8	Penulisan Bab 4-5																								
9	Sidang Tugas Akhir																								

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menampilkan hasil simulasi numerik dari hasil *running* menggunakan *perangkat lunak CFD komersial* mulai dari data, grafik dan penjelasan numerik. Penampilan hasil dan pembahasan studi numerik meliputi profil kecepatan (*velocity profile*) dari visualisasi aliran dan vektor kecepatan (*velocity vector*) pada penampang melintang (*cross section*) yang telah ditentukan. Pada sub-bab yang dibahas adalah data hasil numerik hanya pada kecepatan (v)=10 m/s.

Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa pada penelitian ini dibagi menjadi 2 (dua) variasi, yaitu pembahasan hasil numerik dan visualisasi aliran pada sudut kemiringan 30^0 CW & 30^0 CCW tanpa dan dengan *guide vane* (gv) pada kecepatan sebesar 10 m/s.

4.1 Perbandingan Profil Kecepatan (*velocity profile*) Antara Buka dan Sudut *Damper* $\theta=30^0$ CW dan $\theta = 30^0$ CCW tanpa *guide vane* (gv) Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

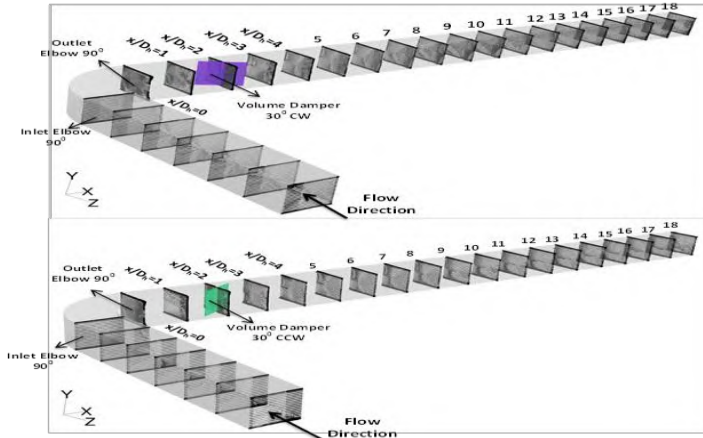
Pembahasan kali ini yaitu tentang perbandingan profil kecepatan antara buka dan sudut *damper* dengan $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW tanpa *guide vane* (gv). Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi yaitu (u/U_{ref}) dimana u adalah kecepatan lokal di setiap *section* mulai dari $x/D_h=0$ (*outlet elbow* 90^0) sampai sepanjang $x/D_h=18$ (*outlet downstream duct*) dan U_{ref} merupakan kecepatan referensi atau kecepatan awal pada *inlet* dari *upstream duct*, yaitu sebesar 10 m/s.

Profil kecepatan (*velocity profile*) pada *square duct* dipengaruhi oleh sudut kemiringan dari *damper* sebagai bodi pengganggu. Kemudian diamati perubahan aliran di dalam *ducting* tersebut menggunakan *software fluent*. Dari perubahan atau evolusi aliran yang telah melewati *damper* akan terlihat jelas bahwa pada sisi inner dari *outlet elbow* 90^0 dan sisi belakang setelah *damper* akan terdapat profil kecepatan (*velocity profile*)

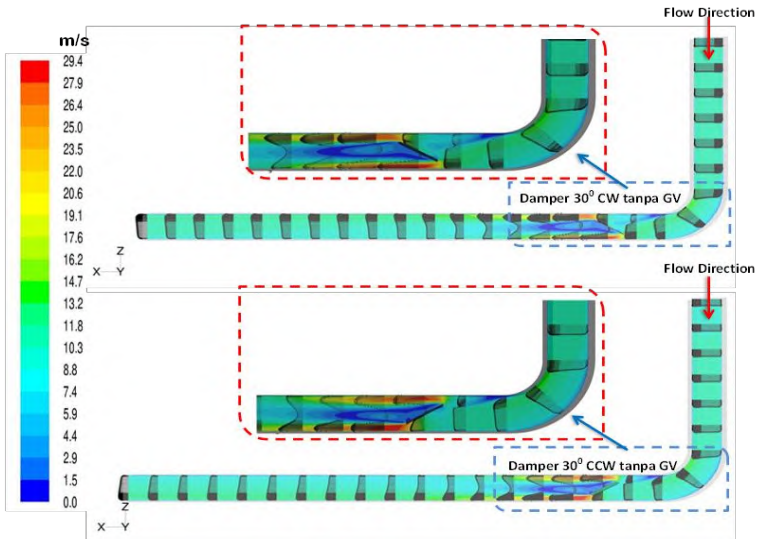
yang berolak dan membentuk pusaran. Sehingga akan terjadi fenomena aliran sekunder (*secondary flow*) dari kecepatan yang memiliki tekanan rendah.

Gambar 4.1 merupakan penggambaran penampang vektor kecepatan di setiap *cross-section* yang terdapat pada seluruh *ducting*. Bagian *upstream duct* perubahan vektor kecepatan (*velocity vector*) tidak begitu terlihat. Ini disebabkan karena fluida yang mengalir pada penampang lurus saja, tanpa ada gangguan apapun yang dilewatinya. Aliran yang melalui *upstream duct* bentuknya *uniform* dengan kecepatan yang sama. Pada setiap *cross-section* selalu terjadi perubahan bentuk vektor kecepatan mulai dari *inlet elbow* 90^0 dan pada bagian *downstream duct*. Ini disebabkan karena pada bagian inner dan outer dari *elbow* 90^0 terdapat perbedaan tekanan yang dilalui dari fluida yang mengalir.

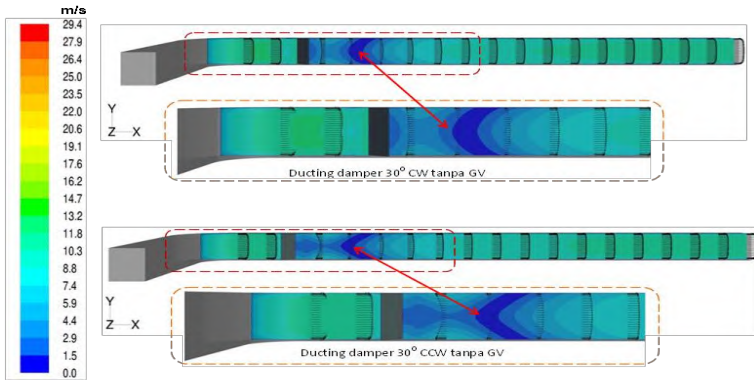
Penggambaran tentang visualisasi aliran profil kecepatan (*velocity profile*) yang akan memperlihatkan perkembangan perbedaan profil kecepatan dan dapat mengetahui pada sisi mana terjadi aliran sekunder (*secondary flow*). Agar lebih jelas, maka dibuatkan pemodelan visualisasi perbandingan profil kecepatan antara sudut bukaan damper 30^0 CW dan 30^0 CCW tanpa *guide vane* (gv) sebagaimana yang tertera pada gambar 4.2 (tampak atas) dan gambar 4.3 (tampak depan).



Gambar 4.1 Penampang vektor kecepatan di setiap *cross-section* damper 30° CW dan 30° CCW tanpa *guide vane*



Gambar 4.3 Perkembangan *velocity profile* bukaan damper 30° CW dan 30° CCW tanpa *guide vane* tampak atas



Gambar 4.3 Perkembangan *velocity profile* bukaan damper 30° CW dan 30° CCW tanpa *guide vane* tampak depan

Gambar 4.2 merupakan profil kecepatan (*velocity profile*) yang melewati *ducting* di setiap titik (*section*) mulai dari *upstream duct* yang panjangnya sampai $z/D_h=6$ dan sisi *downstream duct* panjangnya mulai dari $x/D_h=0$ sampai $x/D_h=18$ yang dihubungkan dengan *elbow* 90°. Pada gambar 4.2 ditekankan tentang penjelasan perkembangan atau evolusi dari profil kecepatan (*velocity profile*) mulai dari *outlet elbow* 90° dimana $x/D_h=0$ sampai sisi *outlet* dari *downstream duct* pada $x/D_h=18$.

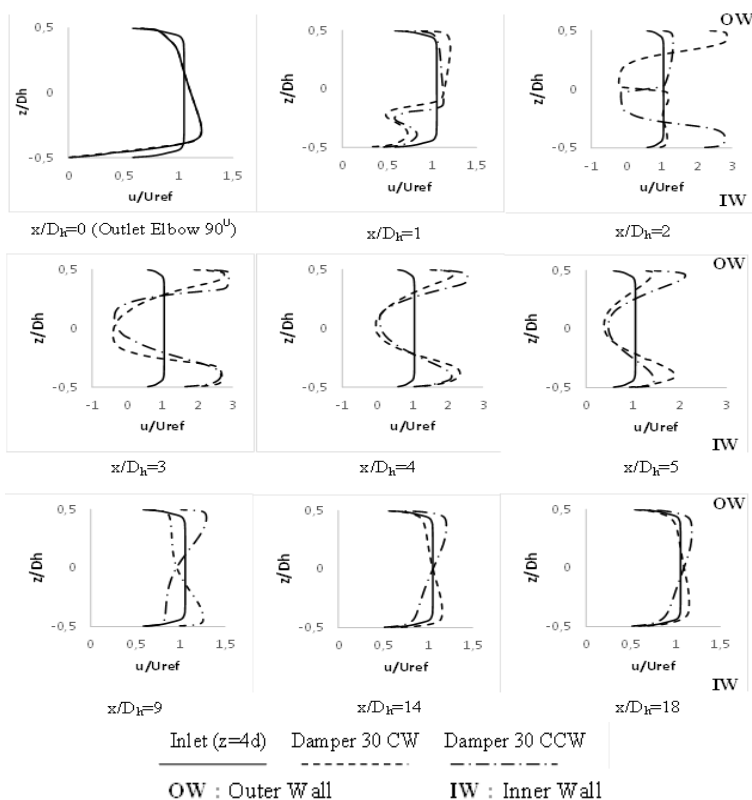
Dapat dilihat bahwa perbandingan profil kecepatan pada gambar 4.2 dan 4.3 yaitu perbedaan visualisasi profil kecepatan (*velocity profile*) yang dilihat dari sisi tampak atas dan sisi tampak depan. Perbedaan profil kecepatan yang terjadi pada aliran dengan bukaan sudut *damper* 30° CW dan 30° CCW tanpa *guide vane* (gv) terlihat tidak terlalu signifikan jika dilihat secara keseluruhan. Berdasarkan visualisasi profil kecepatan, kedua profil kecepatan pada *section* $x/D_h=0$ (*outlet elbow* 90°) untuk bidang horizontal dan vertikal terlihat sama dan terlihat adanya *backflow* pada bagian sisi inner dari *outlet elbow* 90°. Hal ini berarti profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* 90° pada sisi inner dari *outlet elbow* 90° memiliki karakteristik yang mirip.

Perbedaan hanya pada kerapatan profil kecepatan bukaan sudut *damper* 30^0 CW di bagian *outer* lebih rapat dibandingkan dengan bukaan sudut *damper* 30^0 CCW.

Pada gambar 4.2 (tampak atas) terlihat perbandingan profil kecepatan antara bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW tanpa *guide vane* (gv). Untuk sudut bukaan *damper* 30^0 CW tanpa *guide vane* (gv) pada section $x/D_h=1$ terlihat bahwa visualisasi aliran profil kecepatan aliran sekundernya lebih lebar sedikit dibandingkan dengan sudut bukaan *damper* 30^0 CCW. Untuk section $x/D_h=2$ pada posisi profil kecepatan terganggu oleh *damper*, terdapat perbedaan cukup besar yaitu pada sisi *outer* 30^0 CW kecepatannya lebih besar dibandingkan dengan sisi *inner* 30^0 CCW tanpa *guide vane* (gv). Pada gambar 4.3 (tampak depan) terlihat perbandingan profil kecepatan antara sudut bukaan *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW tanpa *guide vane* (gv) tidak ada perubahan yang begitu besar. Setelah aliran yang telah melewati *damper* sejauh $x/D_h=11$ pada *downstream duct* sudah mulai terjadinya *recovery* aliran.

Perbandingan grafik profil kecepatan (*velocity profile*) dilihat dari tampak atas yang akan mendapatkan grafik bidang horizontal.

Absis pada grafik profil kecepatan adalah z/D_h untuk bidang horizontal menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h=0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer elbow* 90^0 , sedangkan $z/D_h=-0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner elbow* 90^0 . Untuk pembahasan lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 4.4 yang berada di bawah ini.



Gambar 4.4 Grafik antara *Inlet* ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut *damper* 30° CW dan *damper* 30° CCW tanpa *guide vane* dilihat dari tampak atas

Pada gambar 4.4 yaitu grafik dengan posisi $x/D_h=0$ (*outlet elbow* 90°) terlihat bahwa pengaruh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, maka tekanan pada sisi *outer elbow* (P_2) lebih besar dibandingkan dengan tekanan sisi *inner elbow* (P_1) yang mengakibatkan aliran pada sisi *outer elbow* menuju ke *inner elbow*. Visualisasi profil kecepatan di posisi $x/D_h=0$ terlihat sama dan terdapat sedikit adanya aliran balik (*backflow*) atau

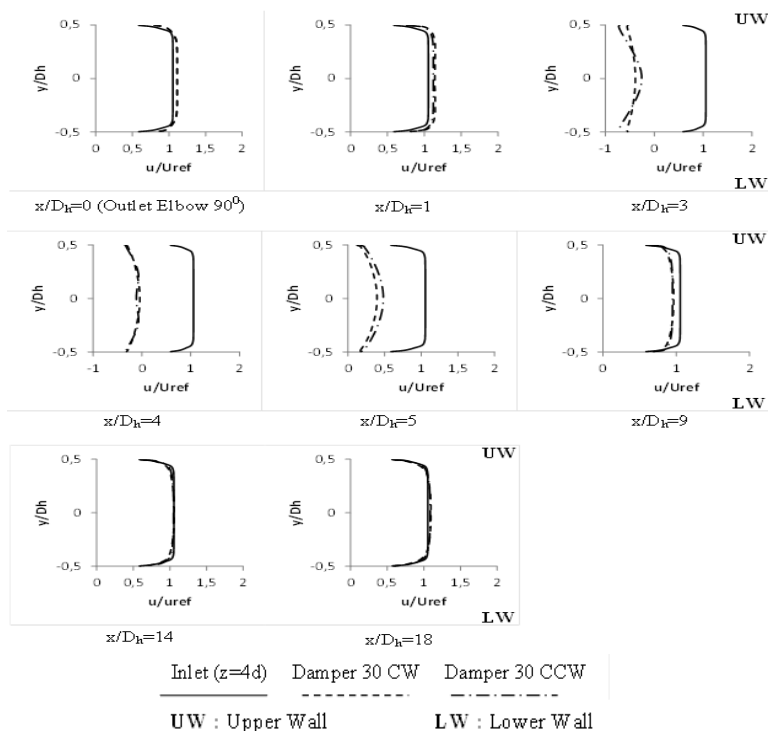
disebut juga aliran sekunder (*secondary flow*) di sisi *inner elbow* 90° karena kecepatan yang dekat dengan dinding tidak mampu mengatasi *gradient* kecepatan di atasnya.

Pada gambar 4.4 posisi $x/D_h = 1$ atau sebelum melewati *damper* kedua profil kecepatan terlihat sama dan terdapat sedikit adanya aliran sekunder (*secondary flow*) di sisi *inner elbow* 90°. Untuk perbandingan gambar, pola grafik pada *damper* 30° CW tanpa *guide vane* kecepatan di posisi *outer wall* lebih besar dibandingkan dengan pola grafik pada *damper* 30° CCW tanpa *guide vane*. Karena perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* dari *elbow* 90°, yang berakibat sebagian besar aliran dari sisi *inner* akan mengalir menuju sisi *outer* karena memiliki kecepatan yang lebih besar.

Ketika aliran terganggu oleh *damper* seperti pada gambar 4.4 pada posisi $x/D_h=2$, terdapat perbedaan yang signifikan pada variasi kedua sudut *damper*, pada bukaan sudut *damper* 30° CW tanpa *guide vane* terjadi percepatan pada sisi *outer wall*. Hal ini disebabkan karena adanya penyempitan luas penampang yang dilakukan oleh *damper*, namun sebagian aliran yang mengalir pada sisi *inner wall* memiliki kecepatan yang lebih rendah. Sedangkan pada bukaan sudut *damper* 30° CCW tanpa *guide vane* sisi *inner wall* yang memiliki kecepatan lebih tinggi dibanding pada sisi *outer wall*. Pada kedua ducting tersebut, terdapat aliran balik (*backflow*) yang terbentuk pada sisi belakang dari *damper* karena memiliki tekanan yang rendah.

Pada gambar 4.4 posisi $x/D_h=3$ dan $x/D_h=4$ atau setelah melewati *damper* kedua profil kecepatan terlihat sama dan terdapat aliran balik (*backflow*) dibelakang *damper* yang cukup besar, itu terjadi karena kecepatan aliran yang terjadi sangat kecil atau hampir mendekati nol (0). Pada kecepatan tersebut, profil kecepatan akan membentuk aliran sekunder (*secondary flow*). Setelah aliran yang telah melewati *damper* sejauh $x/D_h=11$; $x/D_h=14$ dan $x/D_h=18$ pada *downstream duct* sudah mulai terjadinya *recovery* aliran, terlihat pada gambar 4.4.

Perbandingan grafik profil kecepatan (*velocity profile*) dilihat dari tampak atas yang akan mendapatkan grafik bidang horizontal. Absis pada grafik profil kecepatan adalah y/D_h untuk bidang vertikal menunjukkan posisi titik dimana nilai $y/D_h=0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer elbow* 90° , sedangkan $y/D_h=-0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner elbow* 90° . Untuk pembahasan lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 4.5.



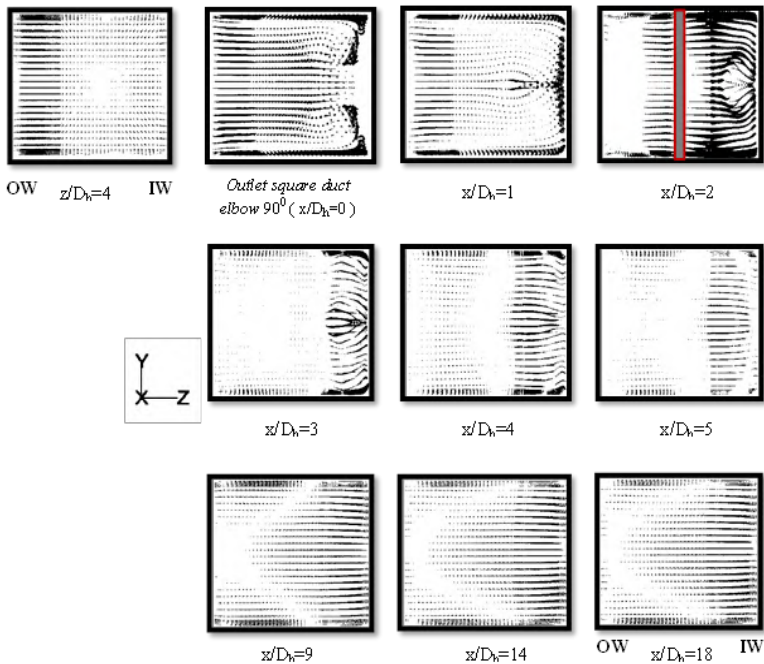
Gambar 4.5 Grafik antara *Inlet* ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut *damper* 30° CW dan *damper* 30° CCW tanpa *guide vane* dilihat dari tampak depan

Pada gambar 4.5 dapat dilihat untuk $x/Dh=0$ dan $x/Dh=1$ model profil kecepatan yang terjadi pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW hampir sama dengan profil kecepatan pada posisi *Inlet* ($z=4d$), tetapi mempunyai kecepatan yang lebih besar sedikit. Untuk $x/Dh=3$ dan $x/Dh=4$ profil kecepatan bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW mengalami aliran balik (*backflow*) dibandingkan dengan profil kecepatan *Inlet* ($z=4d$), terjadinya *backflow* karena aliran terganggu oleh *damper* yang berada di depannya.

Pada gambar 4.5 dapat dilihat untuk $x/Dh=5$ dan $x/Dh=9$ model profil kecepatan yang terjadi pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW mulai mengikuti besar dari profil kecepatan pada *Inlet* ($z=4d$). Disaat aliran sampai *section* $x/Dh=14$, profil kecepatannya mulai berkembang sama dengan profil kecepatan yang dialami oleh *Inlet* ($z=4d$). Setelah aliran udara yang mengalir dalam penampang square duct di posisi $x/Dh=18$, profil kecepatan bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW mengalami sedikit percepatan dibandingkan dengan kecepatan pada *Inlet* ($z=4d$).

4.2 Perbandingan Vektor Kecepatan (*velocity vector*) Antara Buka sudut *Damper* $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW tanpa *guide vane* (gv)

Pembahasan kali ini yaitu tentang perbandingan vektor kecepatan antara bukaan sudut *damper* dengan $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW tanpa *guide vane* (gv). Visualisasi aliran akan diperoleh perbandingan yang lebih jelas mengenai perilaku aliran yang terjadi pada *square duct*.



Gambar 4.6 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW tanpa *guide vane*

profile) yang terlihat lebih kecil pada sisi *inner elbow*. Setelah aliran mengalir sejauh $x/D_h=11$ aliran udara berangsur-angsur kembali mengikuti aliran utamanya dan mengalami *recovery* aliran, hal ini ditandai dari vektor kecepatan berbentuk titik, artinya vektornya tersebut searah dengan sumbu-x. Pada bukaan sudut *damper* 30°CW dan 30°CCW dijumpai aliran sekunder pada sisi *outer* maupun *inner* di posisi $x/D_h= 2$ s/d 4 , hal itu disebabkan karena efek kerugian energi kinetik di sisi *centerline* yang mempengaruhi aliran didekat dindingnya.

4.3 Perbandingan Profil Kecepatan (*velocity profile*) Antara Bukaan Sudut *Damper* $\theta=30^\circ$ CW dan $\theta=30^\circ$ CCW dengan *guide vane* (gv) Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

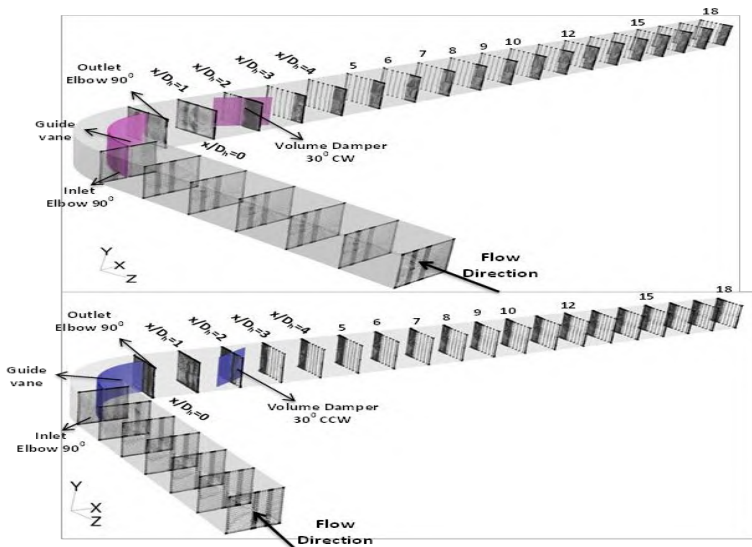
Pembahasan kali ini yaitu tentang perbandingan profil kecepatan antara bukaan sudut *damper* dengan $\theta=30^\circ$ CW dan $\theta=30^\circ$ CCW dengan *guide vane* (gv). Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi yaitu (u/U_{ref}) dimana u adalah kecepatan lokal di setiap *section* mulai dari $x/D_h=0$ (*outlet elbow* 90°) sampai sepanjang $x/D_h=18$ (*outlet downstream duct*) dan U_{ref} merupakan kecepatan referensi atau kecepatan awal pada *inlet* dari *upstream duct*, yaitu sebesar 10 m/s.

Profil kecepatan (*velocity profile*) pada *square duct* dipengaruhi oleh sudut kemiringan dari *damper* sebagai bodi pengganggu. Kemudian diamati perubahan aliran di dalam *ducting* tersebut menggunakan *software fluent*. Dari perubahan atau evolusi aliran yang telah melewati *damper* akan terlihat jelas bahwa pada sisi *inner* dari *outlet elbow* 90° dan sisi belakang setelah *damper* akan terdapat profil kecepatan (*velocity profile*) yang berolak dan membentuk pusaran. Sehingga akan terjadi fenomena aliran sekunder (*secondary flow*) dari kecepatan yang memiliki tekanan rendah.

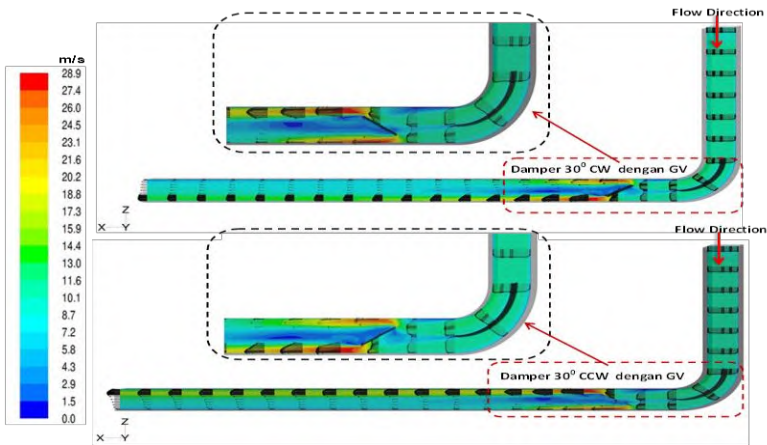
Gambar 4.8 merupakan penggambaran penampang vektor kecepatan di setiap *cross-section* yang terdapat pada seluruh *ducting*. Bagian *upstream duct* perubahan vektor kecepatan

(*velocity vector*) tidak begitu terlihat. Ini disebabkan karena fluida yang mengalir pada penampang lurus saja, tanpa ada gangguan apapun yang dilewatinya. Aliran yang melalui *upstream duct* bentuknya *uniform* dengan kecepatan yang sama. Pada setiap *cross-section* selalu terjadi perubahan bentuk vektor kecepatan mulai dari *inlet elbow 90°* dan pada bagian *downstream duct*. Ini disebabkan karena pada bagian inner dan outer dari *elbow 90°* terdapat perbedaan tekanan yang dilalui dari fluida yang mengalir.

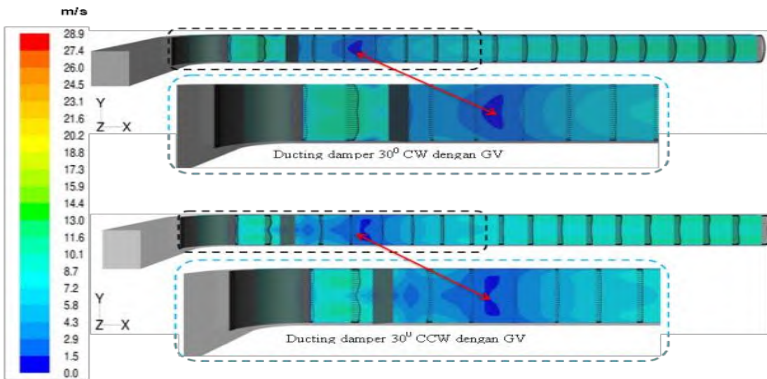
Penggambaran tentang visualisasi aliran profil kecepatan (*velocity profile*) yang akan memperlihatkan perkembangan perbedaan profil kecepatan dan dapat mengetahui pada sisi mana terjadi aliran sekunder (*secondary flow*). Agar lebih jelas, maka dibuatkan pemodelan visualisasi perbandingan profil kecepatan antara sudut bukaan damper 30° CW dan 30° CCW dengan *guide vane* (gv) sebagaimana yang tertera pada gambar 4.9 (tampak atas) dan gambar 4.10 (tampak depan).



Gambar 4.8 Penampang vektor kecepatan di setiap *cross-section* damper 30° CW dan 30° CCW dengan *guide vane*



Gambar 4.9 Perkembangan *velocity profile* bukaan damper 30° CW dan 30° CCW dengan *guide vane* tampak atas



Gambar 4.10 Perkembangan *velocity profile* bukaan damper 30° CW dan 30° CCW dengan *guide vane* tampak depan

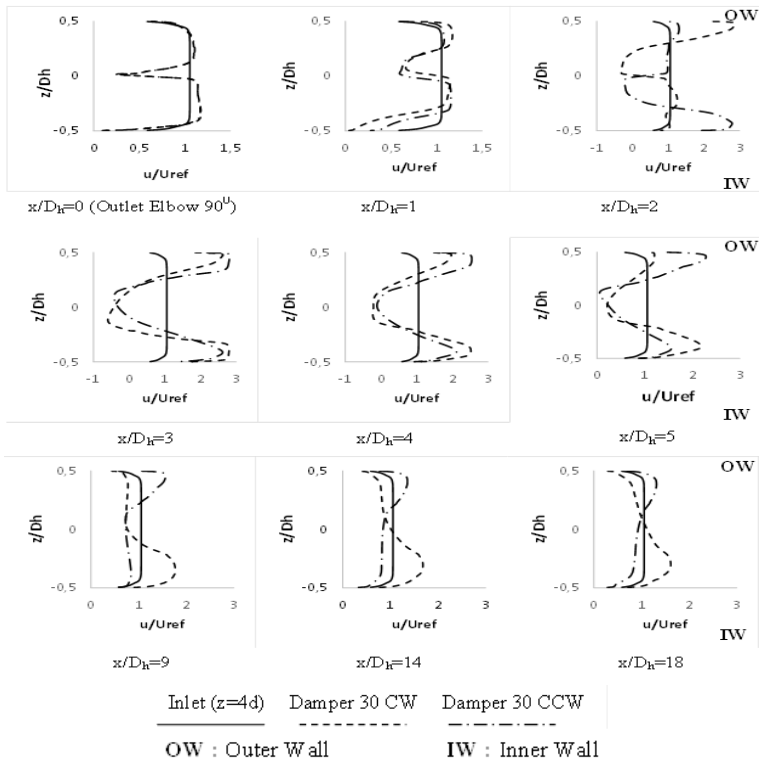
Gambar 4.9 merupakan profil kecepatan (*velocity profile*) yang melewati *ducting* di setiap titik (*section*) mulai dari *upstream duct* yang panjangnya sampai $z/D_h=6$ dan sisi *downstream duct* panjangnya mulai dari $x/D_h=0$ sampai $x/D_h=18$ yang dihubungkan dengan *elbow* 90°. Pada gambar 4.9

ditekankan tentang penjelasan perkembangan atau evolusi dari profil kecepatan (*velocity profile*) mulai dari *outlet elbow* 90^0 dimana $x/D_h=0$ sampai sisi *outlet* dari *downstream duct* pada $x/D_h=18$.

Dapat dilihat bahwa perbandingan profil kecepatan pada gambar 4.9 dan 4.10 yaitu perbedaan visualisasi profil kecepatan (*velocity profile*) yang dilihat dari sisi tampak atas dan sisi tampak depan. Perbedaan profil kecepatan yang terjadi pada aliran dengan bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan *guide vane* (gv) terlihat tidak terlalu signifikan jika dilihat secara keseluruhan. Berdasarkan visualisasi profil kecepatan, kedua profil kecepatan pada *section* $x/D_h=0$ (*outlet elbow* 90^0) untuk bidang horizontal dan vertikal terlihat sama dan terlihat adanya *backflow* pada bagian sisi inner dari *outlet elbow* 90^0 . Hal ini berarti profil kecepatan aliran yang melewati *elbow* 90^0 pada sisi inner dari *outlet elbow* 90^0 memiliki karakteristik yang mirip. Perbedaan hanya pada kerapatan profil kecepatan bukaan sudut *damper* 30^0 CW di bagian *outer* lebih rapat dibandingkan dengan bukaan sudut *damper* 30^0 CCW.

Pada gambar 4.9 (tampak atas) terlihat perbandingan profil kecepatan antara bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan *guide vane* (gv). Untuk sudut bukaan *damper* 30^0 CW dengan *guide vane* (gv) pada *section* $x/D_h=1$ terlihat bahwa visualisasi aliran profil kecepatan aliran sekundernya lebih lebar sedikit dibandingkan dengan sudut bukaan *damper* 30^0 CCW. Untuk *section* $x/D_h=2$ pada posisi profil kecepatan terganggu oleh *damper*, terdapat perbedaan cukup besar yaitu pada sisi *outer* 30^0 CW kecepatannya lebih besar dibandingkan dengan sisi *inner* 30^0 CCW dengan *guide vane* (gv). Pada gambar 4.10 (tampak depan) terlihat perbandingan profil kecepatan antara sudut bukaan *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan *guide vane* (gv) tidak ada perubahan yang begitu besar. Setelah aliran yang telah melewati *damper* sejauh $x/D_h=11$ pada *downstream duct* sudah mulai terjadinya *recovery* aliran.

Perbandingan grafik profil kecepatan (*velocity profile*) dilihat dari tampak atas yang akan mendapatkan grafik bidang horizontal. Absis pada grafik profil kecepatan adalah z/D_h untuk bidang horizontal menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h=0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer elbow* 90° , sedangkan $z/D_h = -0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner elbow* 90° . Untuk pembahasan lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 4.11 yang berada di bawah ini.



Gambar 4.11 Grafik antara *Inlet* ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut *damper* 30° CW dan *damper* 30° CCW dengan *guide vane* dilihat dari tampak atas

Pada gambar 4.11 yaitu grafik dengan posisi $x/D_h=0$ (*outlet elbow* 90°) terlihat bahwa pengaruh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, maka tekanan pada sisi *outer elbow* (P_2) lebih besar dibandingkan dengan tekanan sisi *inner elbow* (P_1) yang mengakibatkan aliran pada sisi *outer elbow* menuju ke *inner elbow*. Visualisasi profil kecepatan di posisi $x/D_h=0$ terlihat sama dan terdapat sedikit adanya aliran balik (*backflow*) atau disebut juga aliran sekunder (*secondary flow*) di sisi *inner elbow* 90° karena kecepatan yang dekat dengan dinding tidak mampu mengatasi *gradient* kecepatan di atasnya.

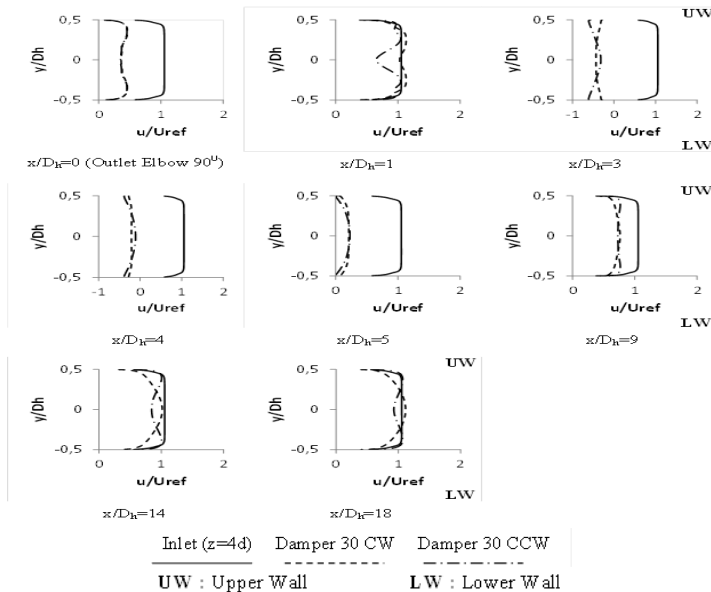
Pada gambar 4.11 posisi $x/D_h=1$ atau sebelum melewati *damper* kedua profil kecepatan terlihat sama dan terdapat sedikit adanya aliran sekunder (*secondary flow*) di sisi *inner elbow* 90° . Untuk perbandingan gambar, pola grafik pada *damper* 30° CW dengan *guide vane* kecepatan di posisi *outer wall* lebih besar dibandingkan dengan pola grafik pada *damper* 30° CCW dengan *guide vane*. Karena perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* dari *elbow* 90° , yang berakibat sebagian besar aliran dari sisi *inner* akan mengalir menuju sisi *outer* karena memiliki kecepatan yang lebih besar.

Ketika aliran terganggu oleh *damper* seperti pada gambar 4.11 pada posisi $x/D_h=2$, terdapat perbedaan yang signifikan pada variasi kedua sudut *damper*, pada bukaan sudut *damper* 30° CW dengan *guide vane* terjadi percepatan pada sisi *outer wall*. Hal ini disebabkan karena adanya penyempitan luas penampang yang dilakukan oleh *damper*, namun sebagian aliran yang mengalir pada sisi *inner wall* memiliki kecepatan yang lebih rendah. Sedangkan pada bukaan sudut *damper* 30° CCW dengan *guide vane* sisi *inner wall* yang memiliki kecepatan lebih tinggi dibanding pada sisi *outer wall*. Pada kedua ducting tersebut, terdapat aliran balik (*backflow*) yang terbentuk pada sisi belakang dari *damper* karena memiliki tekanan yang rendah.

Pada gambar 4.11 posisi $x/D_h=3$ dan $x/D_h=4$ atau setelah melewati *damper* kedua profil kecepatan terlihat sama dan terdapat aliran balik (*backflow*) dibelakang *damper* yang cukup

besar, itu terjadi karena kecepatan aliran yang terjadi sangat kecil atau hampir mendekati nol (0). Pada kecepatan tersebut, profil kecepatan akan membentuk aliran sekunder (*secondary flow*). Setelah aliran yang telah melewati *damper* sejauh $x/D_h=11$; $x/D_h=14$ dan $x/D_h=18$ pada *downstream duct* sudah mulai terjadinya *recovery* aliran, terlihat pada gambar 4.11.

Perbandingan grafik profil kecepatan (*velocity profile*) dilihat dari tampak atas yang akan mendapatkan grafik bidang horizontal. Absis pada grafik profil kecepatan adalah y/D_h untuk bidang vertikal menunjukkan posisi titik dimana nilai $y/D_h=0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer elbow* 90° , sedangkan $y/D_h=-0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner elbow* 90° . Untuk pembahasan lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 4.12.



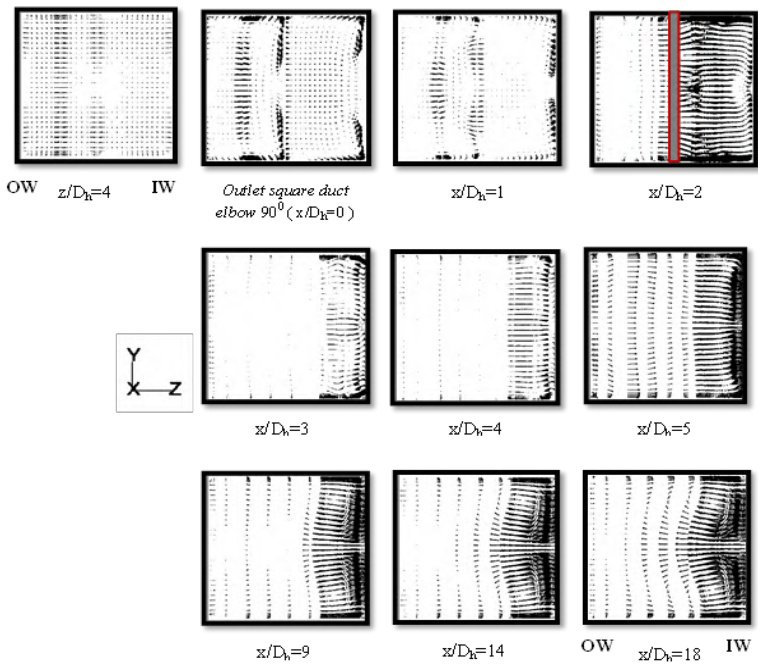
Gambar 4.12 Grafik antara *Inlet* ($z=4d$) yang dibandingkan dengan bukaan sudut *damper* 30° CW dan *damper* 30° CCW dengan *guide vane* dilihat dari tampak depan

Pada gambar 4.12 dapat dilihat untuk $x/D_h=0$ dan $x/D_h=1$ model profil kecepatan yang terjadi pada bukaan sudut *damper* 30° CW dan 30° CCW hampir sama dengan profil kecepatan pada posisi *Inlet* ($z=4d$), tetapi mempunyai kecepatan yang lebih besar sedikit. Untuk $x/D_h=3$ dan $x/D_h=4$ profil kecepatan bukaan sudut *damper* 30° CW dan 30° CCW mengalami aliran balik (*backflow*) dibandingkan dengan profil kecepatan *Inlet* ($z=4d$), terjadinya *backflow* karena aliran terganggu oleh *damper* yang berada di depannya.

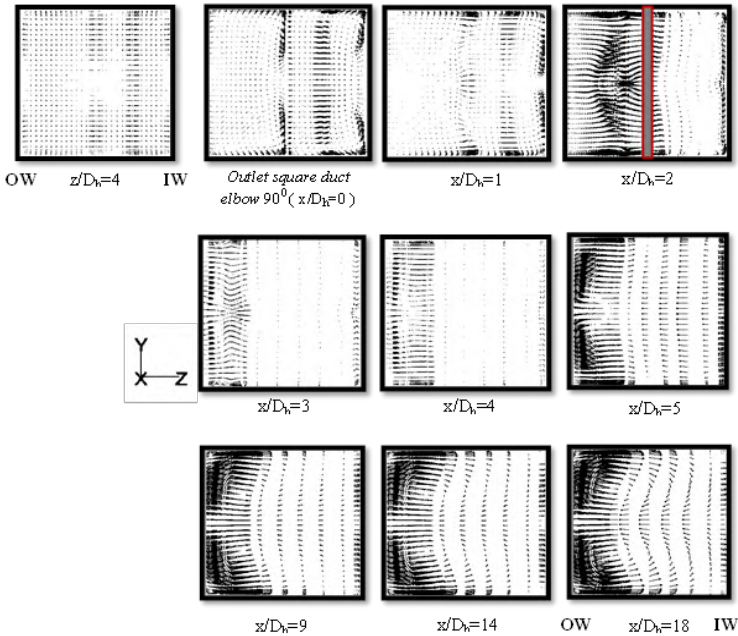
Pada gambar 4.12 dapat dilihat untuk $x/D_h=5$ dan $x/D_h=9$ model profil kecepatan yang terjadi pada bukaan sudut *damper* 30° CW dan 30° CCW mulai mengikuti besar dari profil kecepatan pada *Inlet* ($z=4d$). Disaat aliran sampai *section* $x/D_h=14$, profil kecepatan untuk bukaan sudut *damper* 30° CCW terjadi perlambatan pada bagian $Y/D_h=0$, tetapi untuk bukaan sudut *damper* 30° CW profil kecepatannya berkembang hampir sama dengan kecepatan pada *Inlet* ($z=4d$). Setelah aliran udara yang mengalir dalam penampang *square duct* di posisi $x/D_h=18$, profil kecepatan bukaan sudut *damper* 30° CW mengalami sedikit percepatan dibandingkan dengan kecepatan pada *Inlet* ($z=4d$).

4.4 Perbandingan Vektor Kecepatan (*velocity vector*) Antara Buka-an Sudut *Damper* $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW dengan *guide vane* (gv)

Pembahasan kali ini yaitu tentang perbandingan vektor kecepatan antara bukaan sudut *damper* dengan $\theta=30^0$ CW dan $\theta=30^0$ CCW dengan *guide vane* (gv). Visualisasi aliran akan diperoleh perbandingan yang lebih jelas mengenai perilaku aliran yang terjadi pada *square duct*.



Gambar 4.13 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW dengan *guide vane*



Gambar 4.14 Visualisasi vektor kecepatan pada bukaan sudut damper 30^0 CCW dengan *guide vane*

Gambar di atas merupakan hasil dari penampang *cross-section* berupa vektor kecepatan. Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 adalah visualisasi aliran vektor kecepatan (*velocity vector*) dalam bentuk aliran tiga dimensi dimulai dari inlet pada posisi $z/D_h=4$, *outlet elbow* ($x/D_h=0$) sampai dengan keluaran (*outlet*) dari *downstream duct* ($x/D_h=18$). Pada aliran yang mengalir di dalam suatu penampang bujur sangkar (*square duct*) terdapat aliran yang mengalami perlambatan pada sisi *inner wall* disebabkan terbentuknya aliran sekunder (*secondary flow*) di daerah *outlet elbow* 90^0 . Terjadi perlambatan di daerah *outlet elbow* pada sisi *inner wall* disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder, sehingga hal ini berpengaruh terhadap profil kecepatan (*velocity profile*) yang terlihat lebih kecil pada sisi *inner elbow*. Setelah

aliran mengalir sejauh $x/D_h=11$ aliran udara berangsur-angsur kembali mengikuti aliran utamanya dan mengalami recovery aliran, hal ini ditandai dari vektor kecepatan berbentuk titik, artinya vektornya tersebut searah dengan sumbu-x. Pada bukaan sudut *damper* 30°CW dan 30°CCW dijumpai aliran sekunder pada sisi *outer* maupun *inner* di posisi $x/D_h= 2$ s/d 4, hal itu disebabkan karena efek kerugian energi kinetik di sisi *centerline* yang mempengaruhi aliran didekat dindingnya.

4.5 *Pressure Drop* (ΔP) pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* Fungsi Bilangan *Reynolds* Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

Setelah semua data telah didapat dari penjelasan di atas, selanjutnya yaitu pembahasan tentang *pressure drop* (ΔP) yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini :

Tabel 4.1 *Pressure Drop* (ΔP) *Square Duct* dengan beberapa variasi bukaan sudut *damper* tanpa dan dengan *guide vane* (gv)

Bukaan sudut <i>damper</i>	<i>Pressure Inlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	(ΔP)
0° dengan gv	25,2483	-15,5589	40,8072
30° cw tanpa gv	16,7895	-245,2584	262,0479
30° ccw tanpa gv	15,0122	-262,456	277,4682
30° cw dengan gv	25,5158	-248,1862	273,702
30° ccw dengan gv	24,7259	-251,0974	275,8233

Dapat dilihat hasil nilai dari *pressure inlet* (P1) nilai yang terbesar adalah pada bukaan sudut *damper* 30° dengan gv yaitu sebesar 25,5158 Pascal. Ini disebabkan karena pada bukaan sudut *damper* 30° dengan gv terdapat dua gangguan yaitu berupa *guide vane* (gv) dan *damper*. *Pressure inlet* (P₁) diperoleh dari penampang pada sisi masuk dari *square duct* (*inlet upstream duct*). Ini merupakan efek gangguan yang disebabkan oleh *elbow 90°* dan *guide vane* (gv), maka pada sisi sebelum memasuki

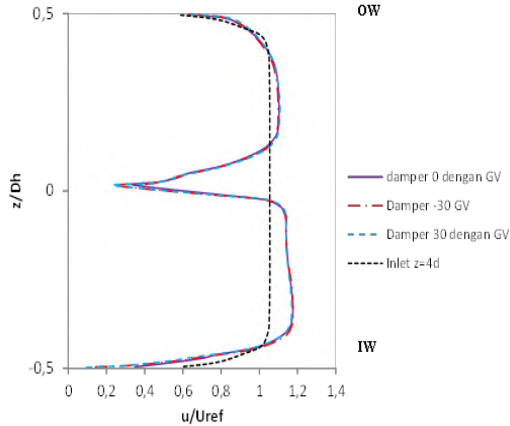
penampang inlet dari *upstream duct* tekanannya lebih besar.

Untuk nilai terkecil dari *pressure outlet* (P_2) adalah pada bukaan sudut *damper* -30° tanpa *gv* yaitu sebesar -262,456 Pascal. Ini disebabkan karena pada bukaan sudut *damper* -30° tanpa *gv* terdapat sebuah *damper* yang mengganggu laju aliran dan menyebabkan aliran yang mengalir tersebut menjadi terhambat. Dari penyumbatan laju aliran ini menyebabkan *pressure outlet* (P_2) dari *downstream duct* menjadi lebih kecil. *Pressure outlet* (P_2) diperoleh dari penampang pada sisi keluar dari *square duct* (*outlet downstream duct*).

Dari Tabel 4.1, dapat kita ketahui untuk hasil *pressure drop* (ΔP) yang terbesar adalah dari bukaan sudut *damper* 30° CCW tanpa *gv* yaitu sebesar 277,4682 Pascal. Untuk hasil *pressure drop* (ΔP) yang terkecil adalah dari bukaan sudut *damper* 0° dengan *gv* yaitu sebesar 40,8072 Pascal. Perbedaan nilai hasil *pressure drop* (ΔP) yaitu karena hasil nilai *pressure inlet* (P_1) dan *pressure outlet* (P_2) berbeda-beda. Perbedaan ini juga disebabkan adanya gangguan yang ditempatkan di dalam sebuah penampang *square duct*, dalam hal ini dapat mengakibatkan laju aliran menjadi tersumbat dan tekanan menjadi mengecil.

4.6 Perbandingan Profil Kecepatan dan Vektor Kecepatan Outlet Elbow 90° dengan Variasi Bukaan Sudut Damper Antara Inlet 0° , 30° CW Dan 30° CCW dengan Guide Vane (gv) Saat $Re = 7,88 \times 10^4$

Semua perbandingan yang telah dibahas di atas, dapat diketahui dari beberapa grafik yang digabungkan antara profil kecepatan antara Inlet ($z=4d$) dengan bukaan sudut *damper* 0° , 30° CW Dan 30° CCW dengan *guide vane* (gv) di *section* $x/D_h=0$ yang terdapat pada gambar 4.15.

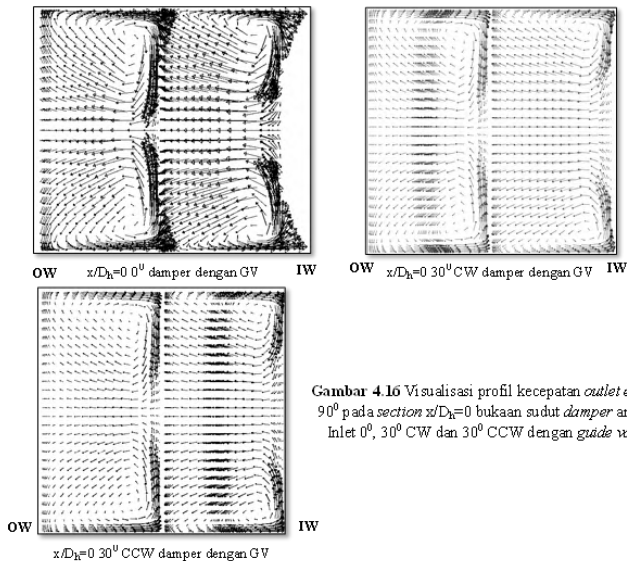


Gambar 4.15 Visualisasi profil kecepatan *outlet elbow* 90° pada *section* $x/D_h=0$ bukaan sudut *damper* antara Inlet 0° , 30° CW dan 30° CCW dengan *guide vane*

Dari grafik pada gambar 4.15 ini dapat kita peroleh visualisasi profil kecepatan *section* $x/D_h=0$ yang hampir sama pada bukaan sudut *damper* antara Inlet 0° , 30° CW Dan 30° CCW dengan *guide vane*. Analisa grafik secara garis besar penambahan *guide vane* pada setiap variasi bukaan sudut *ducting* dapat mengurangi *separation loss* yang terjadi pada *outlet elbow* 90° . Hal ini sesuai dengan fungsi *guide vane* yang bertujuan untuk memecah aliran sekunder (*secondary flow*) disaat melewati *elbow* 90° . Analisa ini dikuatkan dengan tidak adanya *backflow* di daerah *elbow* 90° pada profil kecepatan pada $x/D_h=0$. Bentuk profil kecepatan pada setiap variasi bukaan sudut *ducting* setelah melewati *elbow* 90° , pada sisi *inner wall* lebih besar daripada sisi *outer wall*. Ini disebabkan karena adanya perbedaan tekanan di sisi *inner* dan *outer wall*. Tetapi dari beberapa variasi bukaan sudut *damper* terdapat sedikit perbedaan, yaitu kecepatan antara *outer wall* dengan *inner wall* pada *outlet elbow* 90° . Pada sisi kecepatan *inner wall* mengalami percepatan lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan di sisi *outer* pada *outlet elbow*

90°. Ini disebabkan karena tekanan di sisi *outer* dari *elbow* lebih besar dibandingkan dengan tekanan dari *inner wall*. Jadi, dari tekanan rendah yang dimiliki pada sisi *inner elbow* ditekan oleh tekanan yang ada sisi *outer* pada *outlet elbow* 90°.

Gambar visualisasi vektor kecepatan pada *outlet elbow* 90° aliran dua dimensi akibat dari bukaan sudut *damper* ini akan ditunjukkan pada gambar 4.16.



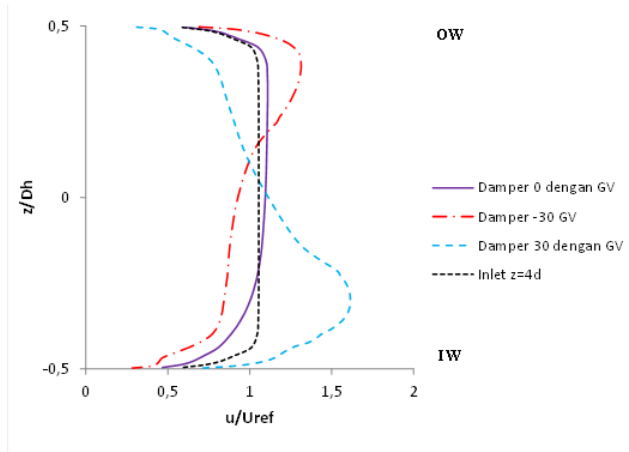
Gambar 4.16 Visualisasi profil kecepatan *outlet elbow* 90° pada *section* $x/D_h=0$ bukaan sudut *damper* antara Inlet 0°, 30° CW dan 30° CCW dengan *guide vane*

Gambar 4.16 di atas dapat dianalisis, bahwa visualisasi vektor kecepatan dengan menambahkan *guide vane* (gv) dapat memecah dan mengurai aliran sekunder yang terjadi di dalam *elbow* 90°. Aliran sekunder yang sangat besar ini terjadi pada sisi *inner wall* di *outlet elbow* 90°. Hal ini akan mempengaruhi besarnya *pressure drop* yang terjadi pada *square duct*. Dengan ditambahkan *guide vane* (gv) pada *elbow* 90°, aliran yang mengalir dan membentuk aliran sekunder dapat dihindari. Sehingga *pressure drop* dapat dikurangi dengan melakukan penambahan *guide vane* (gv) pada *elbow* 90°.

Secara umum, visualisasi vektor kecepatan *square duct* pada jarak $x/D_h=0$ atau pada posisi *outlet elbow* 90^0 memiliki gambar arah aliran yang hampir sama untuk bukaan sudut damper 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW. Pada *square duct*, aliran yang mengalir di dalam *ducting* memiliki model vektor kecepatan yang sama, dimana pada daerah *inner wall* terdapat aliran sekunder yang lebih besar daripada di daerah *outer wall* pada setiap *outlet elbow* 90^0 yang dilalui. Namun dengan menambahkan bukaan sudut *damper* 30^0 terdapat sedikit perbedaan. Pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW dengan *guide vane* (gv), dapat dilihat pada gambar 4.16 diperoleh aliran sekunder yang berpusar lebih besar di daerah *outer wall*. Terbukti dengan gambar arah vektor kecepatan yang lebih tebal pada daerah *outer wall* pada *outlet elbow* 90^0 . Sedangkan pada daerah *inner wall*, aliran sekunder yang terjadi lebih kecil daripada aliran sekunder pada daerah *outer*.

Hal ini juga terdapat pada bukaan sudut *damper* 30^0 CCW dengan *guide vane* (gv), tetapi bentuk vektor kecepatan pada daerah *outer wall* dan daerah *inner wall* berkebalikan dengan *ducting* bukaan sudut *damper* 30^0 CW dengan *guide vane* (gv). Dimana aliran sekunder yang berpusar terjadi pada daerah *inner wall* lebih kuat dibanding pada daerah *outer wall*. Terbukti dengan gambar arah vektor kecepatan yang lebih tebal pada daerah *inner wall* pada *outlet elbow* 90^0 . Adanya perbedaan arah visualisasi vektor kecepatan pada daerah *inner wall* dan *outer wall* ini karena adanya *kinetic losses* yang disebabkan karena besar dari bukaan sudut pada *damper* sebagai pengganggu aliran yang mengalir.

Semua perbandingan yang telah dibahas di atas, dapat diketahui dari beberapa grafik yang digabungkan antara profil kecepatan antara Inlet ($z=4d$) dengan bukaan sudut *damper* 0^0 , 30^0 CW Dan 30^0 CCW dengan *guide vane* (gv) yang terdapat pada gambar 4.17.

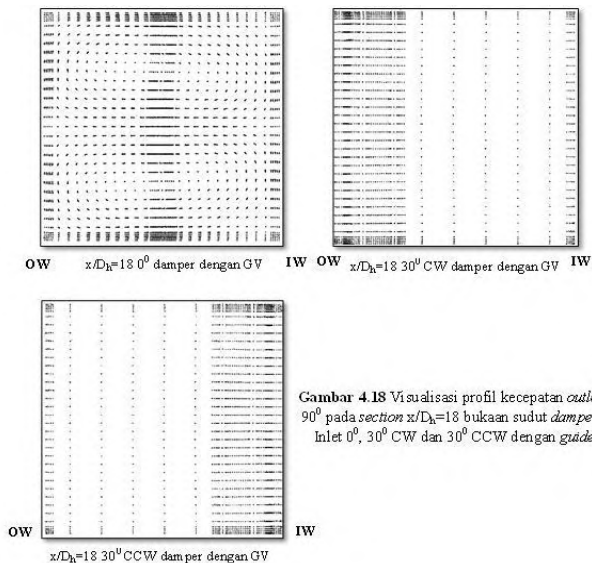


Gambar 4.17 Visualisasi profil kecepatan *outlet elbow* 90^0 pada *section* $x/D_h=18$ bukaan sudut *damper* antara Inlet 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan *guide vane*

Dari grafik pada gambar 4.17 ini dapat kita peroleh visualisasi profil kecepatan yang hampir sama pada bukaan sudut *damper* antara Inlet 0^0 , 30^0 CW Dan 30^0 CCW dengan *guide vane*. Analisa grafik secara garis besar penambahan *guide vane* pada setiap variasi bukaan sudut *ducting* dapat mengurangi *separation loss* yang terjadi pada *outlet elbow* 90^0 . Hal ini sesuai dengan fungsi *guide vane* yang bertujuan untuk memecah aliran sekunder (*secondary flow*) disaat melewati *elbow* 90^0 . Analisa ini dikuatkan dengan tidak adanya *backflow* di daerah *elbow* 90^0 pada profil kecepatan pada $x/D_h=0$. Bentuk profil kecepatan pada setiap variasi bukaan sudut *ducting* setelah melewati *elbow* 90^0 , pada sisi *inner wall* lebih besar daripada sisi *outer wall*. Ini disebabkan karena adanya perbedaan tekanan di sisi *inner* dan *outer wall*. Tetapi dari beberapa variasi bukaan sudut *damper* terdapat sedikit perbedaan, yaitu kecepatan antara *outer wall* dengan *inner wall* pada *outlet elbow* 90^0 . Pada sisi kecepatan *inner wall* mengalami percepatan lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan di sisi *outer* pada *outlet elbow* 90^0 . Ini

disebabkan karena tekanan di sisi *outer* dari *elbow* lebih besar dibandingkan dengan tekanan dari *inner wall*. Jadi, dari tekanan rendah yang dimiliki pada sisi *inner elbow* ditekan oleh tekanan yang ada sisi *outer* pada *outlet elbow* 90^0 .

Gambar visualisasi vektor kecepatan pada *outlet elbow* 90^0 aliran dua dimensi akibat dari sudut bukaan sudut *damper* ini akan ditunjukkan pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Visualisasi profil kecepatan *outlet elbow* 90^0 pada *section* $x/D_h=18$ bukaan sudut *damper* antara Inlet 0^0 , 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan *guide vane*

Gambar 4.18 di atas dapat dianalisis, bahwa visualisasi vektor kecepatan dengan menambahkan *guide vane* (gv) dapat memecah dan mengurai aliran sekunder yang terjadi di dalam *elbow* 90^0 . Aliran sekunder yang sangat besar ini terjadi pada sisi *inner wall* di *outlet elbow* 90^0 . Hal ini akan mempengaruhi besarnya *pressure drop* yang terjadi pada *square duct*. Dengan ditambahkan *guide vane* (gv) pada *elbow* 90^0 , aliran yang mengalir dan membentuk aliran sekunder dapat dihindari. Sehingga *pressure drop* dapat dikurangi dengan melakukan penambahan *guide vane* (gv) pada *elbow* 90^0 .

Secara umum, visualisasi vektor kecepatan *square duct* pada jarak $x/D_h=18$ atau pada posisi *outlet downstream duct* memiliki gambar arah aliran yang berbeda untuk bukaan sudut damper 0° , 30° CW dan 30° CCW. Pada *square duct*, aliran yang mengalir di dalam *ducting* memiliki model vektor kecepatan yang sama, dimana pada daerah *inner wall* terdapat aliran sekunder yang lebih besar daripada di daerah *outer wall* pada setiap *outlet elbow* 90° yang dilalui. Namun dengan menambahkan bukaan sudut damper 30° terdapat sedikit perbedaan. Pada bukaan sudut damper 30° CW dengan *guide vane* (gv), dapat dilihat pada gambar 4.18 diperoleh aliran sekunder yang berpusar lebih besar di daerah *outer wall*. Terbukti dengan gambar arah vektor kecepatan yang lebih tebal pada daerah *outer wall* pada *outlet elbow* 90° . Sedangkan pada daerah *inner wall*, aliran sekunder yang terjadi lebih kecil daripada aliran sekunder pada daerah *outer*.

Hal ini juga terdapat pada bukaan sudut damper 30° CCW dengan *guide vane* (gv), tetapi bentuk vektor kecepatan pada daerah *outer wall* dan daerah *inner wall* berkebalikan dengan *ducting* bukaan sudut damper 30° CW dengan *guide vane* (gv). Dimana aliran sekunder yang berpusar terjadi pada daerah *inner wall* lebih kuat dibanding pada daerah *outer wall*. Terbukti dengan gambar arah vektor kecepatan yang lebih tebal pada daerah *inner wall* pada *outlet elbow* 90° . Adanya perbedaan arah visualisasi vektor kecepatan pada daerah *inner wall* dan *outer wall* ini karena adanya *kinetic losses* yang disebabkan karena besar dari bukaan sudut pada damper sebagai pengganggu aliran yang mengalir.

Untuk posisi *section* $x/D_h=18$ pada gambar 4.18, pada jarak ini aliran fluida yang terjadi sudah mengalami *recovery* aliran. *Recovery* aliran yaitu aliran yang mulai mengalami bentuk seperti aliran pada sisi dari *upstream duct* yang berbentuk titik. *Recovery* aliran yang terjadi pada jarak $x/D_h=18$ sudah terjadi tetapi belum sepenuhnya bentuk alirannya seperti pada vektor kecepatan yang terjadi pada sisi *upstream duct*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian yang telah dibahas pada bab pembahasan maka dapat diambil kesimpulan meliputi sebagai berikut :

1. Aliran yang melewati *elbow* 90^0 yang menghubungkan antara *upstream* dan *downstream straight channel* mengalami perlambatan sesaat sebelum melalui *damper* untuk semua variasi sudut, hal ini disebabkan adanya *blockage effect* akibat terbentuknya aliran sekunder pada sisi *inner wall* dekat dinding.
2. Kecepatan *inlet* yang disetting pada kecepatan 10 m/s akan mengalami percepatan sebesar tiga kali dari kecepatan awal dengan ditambahkannya *damper* dan *guide vane* (gv) yang ditempatkan di dalam *elbow* 90^0 . Ini disebabkan karena terjadinya penyempitan luas penampang di daerah sekitar *damper*, dimana di daerah pada daerah tersebut terjadi percepatan aliran.
3. Pembentukan aliran sekunder (*secondary flow*) pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan dan tanpa *guide vane* (gv) terbentuk aliran sekunder pada sisi *inner* maupun *outer wall*.
4. Pada bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan dan tanpa *guide vane* (gv) pada *section* $x/D_h=2$ sampai $x/D_h=4$ terjadi percepatan yang sangat besar dan terdapat aliran sekunder (*secondary flow*) yang terbentuk tepat di belakang *damper*.
5. Bukaan sudut *damper* 30^0 dengan *guide vane* (gv) merupakan sudut yang paling efektif untuk mempercepat proses *recovery* aliran dan menanggulangi timbulnya aliran sekunder yang terletak di dekat dinding.
6. *Pressure drop* (ΔP) yang didapat dari variasi bukaan sudut *damper* 30^0 CW dan 30^0 CCW dengan dan tanpa *guide vane*

(gv) nilai yang paling besar yaitu 277,4682 Pascal pada bukaan sudut *damp*er 30° CCW tanpa *guide vane* (gv). Sedangkan nilai *pressure drop* terkecil sebesar 40,8072 Pascal pada bukaan sudut damp^{er} 0° dengan *guide vane* (gv).

5.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan untuk kedepannya adalah sebagai berikut :

1. Kajian eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui besarnya *error* dari penelitian simulasi yang telah dilakukan.
2. Adanya penelitian lebih lanjut baik simulasi numerik aliran tiga dimensi atau kajian eksperimen sangat disarankan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cheng, D.Y., 1994. "Laminar Flow Elbow System and Method", **U.S. Patent Documents**, No. 5,323,661.
2. Danbon, F., Sollicec, C., June 2000. "Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque.", **ASME Journal of Fluids Engineering**, Vol.122, pp.337-344.
3. Edo, Edgar S.P., 2016. "Simulasi Numerik Aliran Tiga Dimensi Melalui Rectangular Duct dengan Variasi Bukaam Damper", **JURNAL TEKNIK ITS**, Vol.4, No.1, (2015) ISSN: 2337-3539.
4. Fox, R.W., Mc Donald, A.T., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, 5th edition**. New York: John Wiley and Sons.
5. Ikhwan, Nur. 2009. **Benchmarking Akurasi Pemodelan Turbulensi Dalam Mensimulasikan Aliran Unisotropic Turbulence**. Surabaya : Project Grant QUE_Project, sub - Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS.
6. Miller, D.S. 1990. **Internal Flow System 2nd edition**. Bedford : BHRA.
7. Moujaes S.F., S. Aekula. 2009. CFD Predictions and Experimental Comparisons of Pressure Drop Effect of Turning Vanes in 90° Duct Elbows. JOURNAL OF ENERGY ENGINEERING © ASCE.
8. Nakayama, Y., Boucher, R.F., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics**. Oxford : Butterworth - Heinemann.
9. Rup, K., Sarna, P., 2011. "Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow", **Flow Measurement and Instrumentation** 2011; 22: 383-391.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 24 September 1993, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Aisyiah Surabaya (1997-1999), MI Muhammadiyah 5 Surabaya (1999-2005), SMP Negeri 2 Sukodono Lumajang (2005-2008), dan SMA Negeri 1 Lumajang (2008-2011). Pada tahun 2011 Penulis diterima di Jurusan D3 Teknik Mesin FTI – ITS. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir. Tahun 2014 Penulis melanjutkan studi perkuliahannya Program Lintas Jalur (LJ) di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS. Mekanika Fluida adalah topik Tugas Akhir yang dipilih Penulis untuk menyelesaikan Studinya.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan dan berbagai kegiatan serta bergabung dalam organisasi. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Menjadi staff Departemen Ketaqwaan Terhadap Tuhan Yang Maha Esa (KTTYME) HMDM pada periode 2012-2013, Staff Departemen Sosial Kemasyarakatan (SOSMAS) BEM FTI-ITS 2012-2013, dan Staff Ahli KTTYME HMDM D3 Teknik Mesin ITS 2013-2014. PT Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java (JOB P-PEJ) Tuban merupakan tempat kerja praktek Agustus 2013 di bidang perawatan pompa shipping.

Pelatihan yang pernah diikuti penulis : Pelatihan dasar Pra-TD ITS (2011), Pelatihan Motor Bakar (2012), LKMM TD HMDM FTI-ITS (2012), Pelatihan Peningkatan Aqidah dan Dasar Ilmu Islam (PADII) HMDM FTI-ITS (2012), dan Pelatihan Leadership Organizing Training (LOT) BEM FTI-ITS (2012).

Email : imamnurfachrudin44@gmail.com